

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:
Vera Rede

Robert Mićanović

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Robert Mićanović

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 17-09-2015 Prilog
Klasa: 602-04/15-6 13
Ur.broj: 15-1703-15-351

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ROBERT MIČANOVIĆ**

Mat. br.: 0035184406

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Drvno-plastični kompoziti**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wood-plastic composites**

Opis zadatka:

Životni stil modernog čovjeka rezultira povećanom proizvodnjom i potrošnjom proizvoda od papira i drva, koji nakon korištenja postaju otpad. Jedan do načina zbrinjavanja sve veće količine ovakvog otpadnog materijala jest i proizvodnja kompozitnih materijala s drvom kao punilom. Takvi drvno-plastični kompoziti (WPC) imaju zadovoljavajuća svojstva u različitim područjima primjene.

U okviru završnog rada potrebno je napraviti uzorke drvno-plastičnih kompozita u kojima je kao punilo korištena piljevina. Svi uzorci trebaju imati isti maseni udio punila, a veličinu čestica piljevine treba varirati. Na svim uzorcima izmjeriti tvrdoću, čvrstoću i modul elastičnosti.

Na temelju dobivenih rezultata, potrebno je donijeti odgovarajuće zaključke o utjecaju veličine čestica na mehanička svojstva materijala.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Zadatak zadala:

Vera Rede

Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Zoran Kunica

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stječena znanja tijekom studija i navedenu literaturu

Zahvaljujem se prvenstveno svojoj mentorici dr. sc. Veri Rede koja mi je pomogla u izradi završnog rada.

Također upućujem zahvale tehničkoj suradnici Vesni Đurđi na ustupljenom laboratoriju za mehanička ispitivanja materijala

Zahvaljujem se dr. sc. Lidiji Ćurković na savjetima koji su pomogli u izradi završnog rada

Zahvaljujem se laborantu Božidaru Bušetinčanu na iz Laboratorija za nemetale za pomoć pri ispitivanju mehaničkih svojstava

Robert Mićanović

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA	III
POPIS FORMULA.....	IV
1.Uvod.....	1.
2.Kompoziti	3.
2.1. Matrice u kompozitima.....	4.
2.2. Vlakna u kompozitima.....	5.
3. Svojstva plastike i drva.....	7.
3.1. Svojstva plastike	7.
3.2. Svojstva drva	9.
3.3. Vlaga.....	12.
4. Drvno-plastični kompozit.....	15.
4.1. Toplinska svojstva drvno plastičnih kompozita	17.
4.2. Matrice drvno plastičnih kompozita.....	18.
4.2.1. Polietilen	18.
4.2.2. Polipropilen	19.
4.3. Punilo	20.
4.4. Proizvodnja drvno plastičnih kompozita.....	22.
5. Eksperimentalni dio – izrada drvno plastičnih kompozita.....	24.
5.1. Priprema drvnog brašna.....	24.
5.2. Izrada drvno plastičnog kompozita	26.
5.3. Izrezivanje uzoraka.....	28.
6. Ispitivanje mehaničkih svojstava.....	34.
6.1. Ispitivanje savojne čvrstoće.....	35.
6.2. Ispitivanje tvrdoće metodom utiskivanja kuglice	36.
7. Rezultati	36.
7.1. Savojna čvrstoća i modul elastičnosti	36.
7.2. Tvrdoća	45.
8. Zaključak	47.
POPIS LITERATURE.....	48.
Prilog 1.....	49.

Prilog 2.....	50.
Prilog 3.....	51.
Prilog 4.....	52.
Prilog 5.....	53.

POPIS SLIKA

- Slika 1. Dijagram naprezanje- istezanje vlaknima ojačanog kompozita
- Slika 2. Nominalni dijagram rastezno naprezanje – istezanje
- Slika 3. Različite vrste drva
- Slika 4. Dijagram relativne vlažnosti
- Slika 5. Primjeri primjene drveno plastičnih kompozita
- Slika 6. Prikaz utjecaja temperature na sušenje i dekompoziciju drva
- Slika 7. Shematski prikaz procesa ekstrudiranja
- Slika 8. Sito sa otvorima veličine 5 mm
- Slika 9. Sito sa otvorima veličine 2 mm
- Slika 10. Prosijani uzorci različitih vrsta drva različitih veličina čestica
- Slika 11. Kalup korišten za WPC-a krupnijih čestica
- Slika 12. Izrezivanje uzoraka
- Slika 13. Kompozit sa sitnim česticama hrasta
- Slika 14. Kompozit sa sitnim česticama bukve
- Slika 15. Kompozit sa sitnim česticama tikovine
- Slika 16. Kompozit sa sitnim česticama smreke
- Slika 17. Kompozit sa sitnim česticama oraha
- Slika 18. Kompozit s krupnim česticama hrasta
- Slika 19. Kompozit s krupnim česticama bukve
- Slika 20. Kompozit s krupnim česticama tikovine
- Slika 21. Kompozit s krupnim česticama smreke
- Slika 22. Kompozit s krupnim česticama oraha
- Slika 23. Univerzalna kidalica
- Slika 24. Uzorak s krupnijim česticama nakon ispitivanja savojne čvrstoće
- Slika 25. Uzorci nakon ispitivanja savojne čvrstoće
- Slika 26. Dijagram savojnih čvrstoća za različite vrste drva za tri epruvete
- Slika 27. Dijagram srednjih vrijednosti savojnih čvrstoća

Slika 28. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti

Slika 29. Srednje vrijednosti modula elastičnosti

POPIS TABLICA

Tablica 1. Svojstva kompozitnih matrica

Tablica 2. Gustoća korištenih vrsta drva

Tablica 3. Mase komponenata za izradu uzoraka

Tablica 4. Izračunate vrijednosti za kompozite s manjim česticama

Tablica 5. Izračunate vrijednosti za kompozite s većim česticama

Tablica 6. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama -
tikovina

Tablica 7. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama - hrast

Tablica 8. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama - bukva

Tablica 9. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama – orah

Tablica 10. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama -
smreku

Tablica 11. Tvrdća za različite vrste drva

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
PA		Poliamid
PP		Polipropilen
ABS		Akrilo nitril-butadien stiren
PE-LD		Polietilen niske gustoće
PE-HD		Polietilen visoke gustoće
m	g	Masa
ρ	g/m^3	Gustoća
V	m^3	Volumen
h	mm	Debljina uzorka
b	mm	Širina uzorka
l	mm	Duljina uzorka
R_{\max}	N/mm^2	Savojna čvrstoća
F_{\max}	N	Maksimalna sila
L	mm	Razmak između oslonaca
E	N/mm^2	Savojni modul elastičnosti
ΔF	N	Prirast sile
Δf	mm	Progib
H	N/mm^2	Tvrdoća
F	N	Sila
h_p	mm	Dubina prodiranja kuglice
D	mm	Promjer kuglice za ispitivanje tvrdoće

1. Uvod

U suvremenom životu čovjeka recikliranje je postalo nužna potreba za zbrinjavanjem otpada. Ono uključuje odvajanje otpadnog materijala iz otpada u svrhu njegove ponovne upotrebe. Sastoji se od sakupljanja, izdvajanja, prerade te izrade proizvoda nanovo [1].

Drveno plastični kompoziti (wooden plastic composite - WPC) jedan je od primjera modernih materijala, dobivenih spajanjem dviju supstanci koje su najčešće produkti recikliranja. Radi se o plastici i drvu. Drvo se danas primjenjuje za izradu vrlo različitih mnogobrojnih proizvoda, a prilikom njegove prerade ostaje otpadni materijal nema značajniju tehničku svrhu. Taj „otpadni materijal“ može se iskoristiti za izradu drveno plastičnih kompozita. Plastični materijal također je pogodan za recikliranje. Njegova najčešća primjena je u proizvodnji ambalažnih materijala, a uz to se može pronaći u graditeljstvu, tekstilnoj industriji, medicini i sl. Zbog velike primjene pojavljuju se veliki problemi odlaganja velike količine otpada zbog dugog vremenskog razgrađivanja u prirodi. Zbog toga je plastični materijal, uz drvo, jedan od vrlo vrijednih sirovina za recikliranje, a time i proizvodnju drveno plastičnih kompozita [2].

Industrijski razvoj uvelike je utjecao na uništenje drveća i šuma, uništavajući pritom prirodna staništa mnogih biljnih i životinjskih vrsta, te izvor kisika. Problem deforestizacije postao je svjetski problem. Trebalo je pronaći način da se smanji uništavanje šuma i da se drvo zamjeni nekim drugim odgovarajućim materijalima. Prije tridesetak godina inženjerska firma u Japanu osmislila je i proizvela zamjenu za drvo, izrađenu od drvnog otpada i reciklirane polimerne smole. Novi materijal imao je kvalitetu najrijedih vrsta drva, zadržavajući pritom ekološka svojstva, te je doživio veliki uspjeh. Kvaliteta i dugi životni vijek proizvoda, napravljenih od ovih materijala, rezultirali su uspješnošću ovog proizvoda. U zadnjih nekoliko godina tržišni udio drveno plastičnih kompozita u arhitektonskom uređenju javnih i privatnih sektora u Aziji dosegao je čak 60%. Danas mnogobrojne svjetske firme proizvode različite vrste drveno plastičnih kompozita, različitih kvaliteta i udjela materijala, što je uzrokovalo veliku svjetsku konkurenciju, a time i proizvodnju ovoga materijala [3].

Cilj ovog rada je izraditi uzorke drveno plastičnih kompozita korištenjem otpadnog materijala od različitih vrsta drva. Polistirenska matrica ojačana je drvnim česticama različite veličine. Na dobivenim kompozitima ispitana su i uspoređena sljedeća svojstva: modul elastičnosti,

savojnu čvrstoću i tvrdoću. Na temelju dobivenih rezultata doneseni su odgovarajući zaključci o utjecaju vrste drva i veličine čestica na kvalitetu izrađenih kompozita.

2. Kompoziti

Kompoziti su materijali proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava, s jasnom granicom između komponenata. Kao rezultat dobiven je materijal takvih svojstava kakve ne posjeduje ni jedna komponenta sama za sebe. Različiti materijali koji ulaze u sastav kompozita daju novi, jedinstveni materijal sa svojstvima koja su posve različita od svojstava polaznih komponenata. Stvaranjem kompozita ne dolazi do miješanja polaznih materijala pa se kompozit može nazvati višefaznim materijalom. Faze unutar kompozita jasno se vide i razlikuju. Kompoziti imaju vrlo veliku mogućnost izrade veoma složenih oblika, a postoji i mogućnost spajanja dijelova tijekom samog postupka proizvodnje. Time se mogu smanjiti troškovi naknadne obrade dijelova. Svojstva kompozita ovise o vrsti materijala matrice i ojačala, veličini i rasporedu, volumnom udjelu, obliku, te prirodi i jakosti veze između konstituenata. Za kompozite općenito vrijedi da posjeduju vrlo veliku dimenzijsku stabilnost, da se mogu primjeniti pri vrlo različitim radnim uvjetima, a mnogi od njih posjeduju izrazito visoku korozijsku otpornost. Kombinacija svojstava daje im unikatni značaj što ih čini vrlo posebnim tehničkim materijalima [4].

Kompozitni materijali sastoje se od dva osnovna konstituenta:

- Matrice
- Ojačala

Matrica ima zadatak da:

- Drži ojačala zajedno
- Štiti ojačala od vanjskih utjecaja
- Prenosi opterećenja na ojačalo
- Daje vanjsku formu kompozitu
- Štiti kompozit od utjecaja atmosfere

Zadaća ojačala je da osigura visoku čvrstoću, visoki modul elastičnosti (krutost) i otpornost na trošenje kompozita.

Kompoziti se sistematiziraju prema vrstama matrice i prema obliku ojačala.

2.1. Vrste matrice

Prema vrstama matrice kompoziti se dijele na:

- Metalna matrica (MMC) – Al, Ti, Cu i Mg legure, superlegure i dr.
- Keramička matrica (CMC) – Al_2O_3 , SiC, ZrO_2 i dr.
- Polimerna matrica (PMC) – poliesterske smole, vinilesterske smole, epoksidne smole, PA, PP i dr.

U ovisnosti o vrsti matrice i ojačala kompoziti će posjedovati različita tražena svojstva. Oni istovremeno mogu postići visoku čvrstoću i krutost uz relativno malu masu.

U tablici 1. možemo vidjeti kako različite matrice utječu na svojstva kompozita [4].

Tablica 1. Svojstva kompozitnih matrica

Svojstva	Metali	Polimeri	Keramika
Gustoća, (kg/m^3)	2000-16000	1000-2000	2000-17000
Talište, ($^{\circ}\text{C}$)	200-3500	70-200	2000-4000
Toplinska provodljivost	visoka	niska	srednja
Toplinska rastezljivost	srednja	visoka	niska
Specifični toplinski kapacitet	nizak	srednji	visok
Električna vodljivost	visoka	vrlo niska	vrlo niska
Vlačna čvrstoća (MPa)	100-2500	30-300	10-400
Modul elastičnosti (GPa)	40-400	0,7-3,5	150-450
Tvrdoća	srednja	niska	visoka
Otpornost na koroziju	srednja-slaba	dobra-srednja	dobra

2.2. Vrste ojačala

Prema ojačalima kompoziti se dijele na:

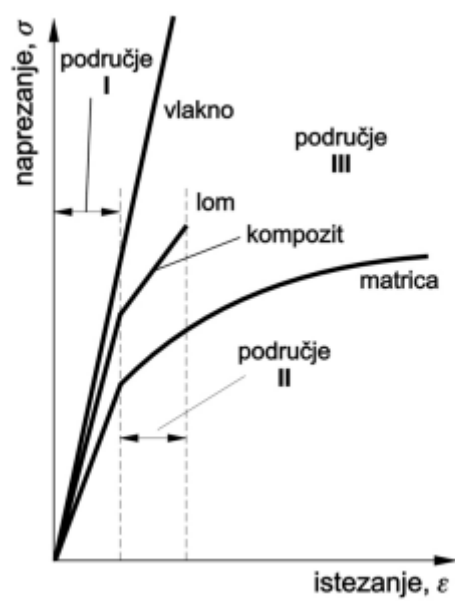
- kompozite s česticama,
- vlaknima ojačane kompozite,
- slojevite kompozite,
- sendvič konstrukcije.

Česticama ojačani kompoziti sadrže jednolično raspoređene čestice koje su uglavnom tvrde i krhke, dok matrica služi za obavljanje i povezivanje čestica. Matrica je mekanija i duktilnija. Struktura ovih kompozita je višefazna i nema transformacije faza. Razlikujemo dvije vrste kompozita s česticama: kompozite s disperzijom (čestice $< 0,1\mu\text{m}$) i kompozite s velikim česticama ($> 1\mu\text{m}$). Čestice su najčešće izrađene od [4.]:

- oksida (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiO_2 , i dr.),
- nitrida (BN , i dr.),
- karbida (SiC , TiC , WC , B_4C , i dr.).

Uloga čestica je povećanje otpornosti na trošenje i povećanje mehaničke otpornosti pri povišenim temperaturama.

Kod vlaknima ojačanih kompozitima postoje razni kriteriji prema kojima se svrstavaju vlakna. Kriteriji mogu biti vrsta materijala, duljina, promjer, orijentacija i sl. Primjenjuju se u slučajevima kada se traže svojstva koja su znatno bolja u smjeru vlakana. Vlakna su nositelji opterećenja, a zbog visoke čvrstoće mogu zaustaviti širenje pukotine i u mikro području. Uloga matrice je da poveže vlakna i prenese opterećenja na njih. Također je važno da matrica dobro prijanja uz vlakna, da kemijski ne reagira s njima i da ih zaštiti od utjecaja atmosferlija. Na slici 1. Prikazan je dijagram naprezanje – istezanje za vlaknima ojačan kompozit.



Slika 1. Dijagram naprezanje- istezanje vlaknima ojačanog kompozita [4.]

3. Svojstva komponenata drveno plastičnih kompozita

3.1. Svojstva polimernih materijala

Polimerni materijali ili plastika predstavlja materijale izrađene od prirodnih ili sintetskih polimera. Jedni su od najvažnijih tehničkih materijala. Njihov sastav čini polimerna osnova – polimerizat, te dodaci koji poboljšavaju njihova preradbena i uporabna svojstva. Sastoje se od ponavljajućih jedinica monomera čiji broj ponavljanja određuje stupanj polimerizacije. O stupnju polimerizacije ovise mnoga svojstva polimera.

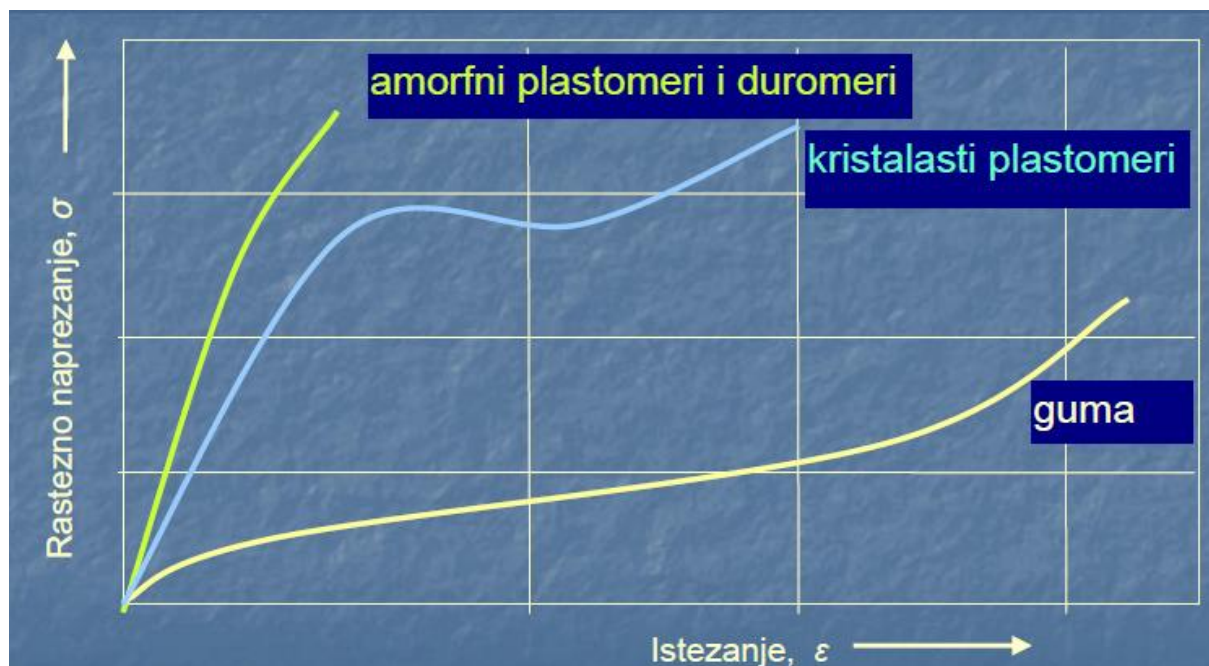
Prirodne polimere su celuloza, škrob, bjelančevine i kaučuk, dok sintetske dobijamo kemijskom reakcijom polimerizacije najčešće iz nafte, ugljena ili zemnog plina. Prema načinu na koji nastaju, sintetske polimere dijelimo na polimere nastale stupnjevitom reakcijom (kondenzacijska ili adicijska) i polimere nastale lančanom reakcijom.[5.]

Neka dobra svojstva sintetskih polimera su:

1. mala gustoća – što znači da je i masa materijala mala što uvelike utječe na masu konstrukcija, vozila i proizvoda rađenih od polimera;
2. visoka otpornost na koroziju i kemikalije – korozija je jedan od glavnih uzročnika raspada i uništavanja materijala što dovodi do prirodnih i finansijskih nepogodnosti. Polimerni materijali uvelike su zamijenili čelične dijelove nekih proizvoda podložnih koroziji gdje mogu zadovoljiti zahtjeve zadane pri radnim uvjetima;
3. dobri električni, zvučni i toplinski izolatori – u današnje vrijeme potreba za izolatorima je u gotovo svim granama industrija;
4. dobra optička svojstva – mogu biti prozračni, prozirni i neprovidni, što između mehaničkih svojstva vidno utječe i na estetski izgled.

Mehanička svojstva su jedna od najvažnijih svojstva kod zahtjeva za izradu materijala. Na mehaničke karakteristike polimernih materijala najznačajnije utječu temperatura i vrijeme. Snižanjem temperature i povećanjem brzine opterećivanja (deformiranja) raste čvrstoća, odnosno krutost polimernih materijala [5].

Na slici 2. prikazan je dijagram naprezanje – istezanje za različite vrste polimernih materijala.



Slika 2. Nominalni dijagram rastezno naprezanje – istezanje [6]

Kako nijedan materijal nije savršen tako i polimeri imaju svoje nedostatke. Jedan od glavnih nedostataka je slaba stabilnost polimera prema djelovanju temperature i degradirajućih agensa. To uključuje starenje polimera, deformaciju materijala, pojavu sitnih pukotina na površini, izlučivanje pigmenata, promjenu boje i sl. Osim toga, u odnosu na druge tehničke materijale, polimeri imaju relativno slabija mehanička svojstva, pa ih to isključuje iz određenih područja primjene.

Za tražena svojstva matrice drveno plastičnih kompozita polimeri su dovoljno dobar materijal.

3.2. Svojstva drva

Drvo je materijal dobiven prirodnim putem, najčešće od debla stabala. Može se reći da je to nehomogen, anizotropan, porozan, vlaknast i higroskopan materijal čiji sastav čini celuloza, hemiceluloza i lignin, te popratne tvari (smole, minerali i dr.). Njegova svojstva odraz su prirodnog porijekla i staništa.

Građu drva čine stanice, koje se sastoje od stijenke i lumena, i koje se zbog svog izduženog oblika nazivaju vlakanca drva. Uz vlakanca drvo sačinjavaju i druge vrste stanica. One uzrokuju nehomogenost strukture drva. Veličina i oblik drvne stanice ovise o vrsti drva, o godišnjem dobu nastajanja, o staništu i nizu drugih utjecajnih faktora. Anizotropnost drva uzrokovana je položajem vlakanca, dok je poroznost određena odnosom stijenki i lumena vlakanca. S obzirom na prirodnu građu drva koja je izrazito usmjerena, usmjerena su i mehanička svojstva drva [7].

Drvo se danas primjenjuje u gotovo svim granama života. U građevinskoj industriji iz dana u dan raste potreba za korištenjem drva i njegovih produkata. U odnosu na beton, čelik, opeku ili lake materijale drvo se smatra gospodarski veoma isplativom alternativom. Uz funkcionalnost jedna od najvažnijih karakteristika drva su njegova estetska svojstva, što uvelike dopušta čovjeku da se osjeća kao dio prirode. Svaki komad drva je individualan, unikatan i građen na svoj način što doprinosi estetskom dizajnu i zadovoljstvu osobe. Može poslužiti kao materijal za gradnju interijera i za gradnju eksterijera. Osim u građevini drvo, služi kao materijal u gradnji namještaja, mostova, brodova, te kao izvor energije. Drvo iz stabala i grmova, može se preraditi u papir, fotografski film, celofan, umjetnu svilu i sl. [8].

Drvo se koristi kao ogrijevni materijal za dobivanje toplinske energije ili kao fertilizator. Ono spada u čvrste biomase gdje je najkorištenija sirovina za dobijanje energije [9].

Na slici 3. mogu se vidjeti različite površine drva



Slika 3. Različite vrste drva [10]

Svojstva drva dijele se na [11]:

- Fizikalna: Svojstva zbog prirodnog porijekla (nano, mikro, makro), anatomska građa (anizotropnost i nehomogenost), razina ustroja i građe, gustoća, poroznost, sadržaj vlage, sorpcija, dimenzijske ili volumne promjene;
- Kemijska: svojstva zbog prirodnog podrijetla (molekularna razina ustroja i kemijski sastav), aciditet, alkalitet;
- Mehanička: čvrstoća, elastičnost, tvrdoća;
- Termička: toplinsko rastezanje, toplinska vodljivost, specifična toplota, koeficijent difuzije topline;
- Električna: vodljivost i otpor, faktor energije, dielektrična konstanta;
- Akustična: vodljivost zvuka, rezonancija, adsorpcija;
- Estetska: boja, sjaj, miris, finoća, tekstura.

Drvo se odlikuje mnogim prednostima koje su određene njegovim svojstvima. S ekološkog pogleda drvo je jedan od najiskorištenijih materijala, jer se gotovo svaki komad drva iskoristi, čak i kora i piljevina. Velika ekonomičnost vidljiva je na uštedi energije pri proizvodnji drvenih produkata u usporedbi s drugim materijalima.

Prednosti drva:

- mala gustoća,
- relativno velika čvrstoća paralelno s vlaknima,
- mogućnost oblikovanja,
- laka obradivost,
- estetski dojam,
- iskorištavanje ostataka iz drugih procesa,
- dobivanje uniformnog materijala.

Nedostaci drva:

- ovisnost kvalitete i ujednačenosti o prirodnim resursima (stanište) i okruženju (vlaga),
- potreba za zaštitom od atmosferlija, požara i biotičkih uzročnika propadanja,
- osjetljivost kvalitete u uvjetima sušenja i skladištenja (dimenzijske promjene),
- cijena.

Postoje dva veoma bitna uzročnika propadanja drva. To su starenje drva i biološko propadanje drva.

Pod starenjem drva podrazumjeva se propadanje materijala koje je uvjetovano djelovanjem vlage, svjetlosti, vjetra, kiše, promjenama temperature, kemijskim i biološkim čimbenicima. Ono uključuje fizikalne i kemijske promjene u materijalu, a može se manje ili više usporediti fizikalnim i kemijskim postupcima. Trajnost drva ovisi o kemijskom sastavu drva, procesu osržavanja, sadržaju smole, gustoći drva, vremenu sječe, postupku nakon sječe, utjecaju staništa itd. Mikroorganizmi, mehaničke ozljede i vlaga ograničavaju trajnost drva koja se može povećati konzerviranjem.

Biološko propadanje drva je prirodno propadanje drva. Glavni uzročnici su bakterije, gljive i plijesni, kukci, te morski organizmi, dok su utjecajni faktori temperatura i vlaga. Degradacija drva može nastupiti u bilo kojoj fazi prerade i primjene drva ako nije provedena zaštita.

Za prevenciju i ublaživanje starenja i biološkog propadanja drva koristimo kemijske postupke zaštite. Razlikuju se postupci pod povišenim tlakom i bez povišenog tlaka, dok kod sredstva za zaštitu razlikujemo ona koja su topiva u ulju i ona koja su topiva u vodi. Stupanj zaštite ovisi o toksičnosti sredstva, trajnosti, zadržavanju i dubini prodiranja.

Osim prevencije i ublažavanja biološkog propadanja, drvu možemo otkloniti i druge njegove prirodne nedostatke: dimenzijsku ograničenost, anizotropnost, higroskopnost i dr. Drvo možemo modificirati kemijskim, fizikalnim i drugim procesima [11].

3.3. Vlaga

Udio vlage u drvu jedan je od najvažnijih karakteristika drva. Drvo je higroskopan materijal što znači da može upiti ili otpustiti vlagu, ovisno o uvjetima koji vladaju u okolišu. Vlaga utječe na povećanje ili smanjenje dimenzija (bubrenje ili skupljanje drva) u ovisnosti o stupnju tih promjena. Bubrenje i skupljanje drva je odgovorno za mnoge nepravilnosti i disfunkcionalnosti u gotovim produktima drva [12].

Kada je drvo prvi put sječeno smatra se da je u „zelenom stanju“ i sadrži veoma veliku količinu vlage. Ta vlaga postoji u dva oblika:

- kao slobodna voda u tekućem obliku, koja se nalazi u porama i pukotinama drva,
- kao vezana voda koja je „zarobljena“ u staničnoj stijenci.

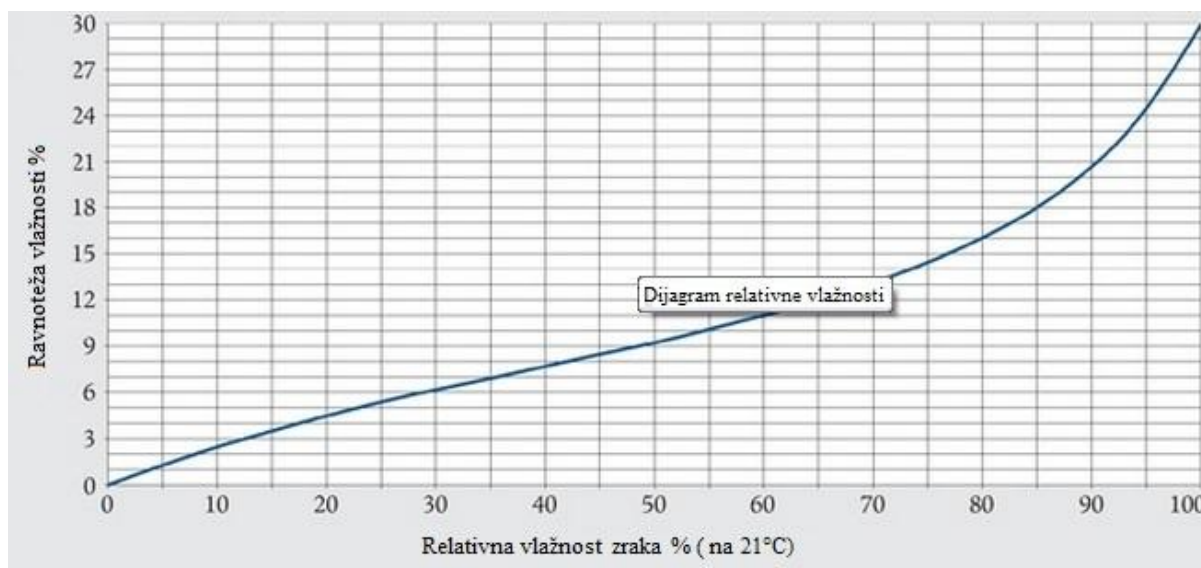
U trenutku kada je svježi komad izrezanog drveta izložen zraku, odmah započinje gubiti slobodnu vodu. U tom trenutku drvo se ne skuplja niti mijenja dimenzije jer su vlakna i dalje u potpunosti zasićena vezanom vodom. Kada drvo izgubi svu slobodnu vodu doći će u točku zvanu točka zasićenosti vlakna (FSP – fiber saturation point) [12].

Ispod te točke drvo počinje gubiti vezanu vodu, a tim procesom započinje i dimenzijska promjena drva tj. skupljanje drva. Nastupanjem tog stadija drvo više nije u „zelenom stadiju“ već počinje stadij sušenja.

Količina izgubljene vlage u drvu ovisi o dva vanjska utjecajna faktora: temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka. Sastav vlage u drvu mjeri se formulom:

$$\text{Količina vlage \%} = (\text{masa vlažnog drva} - \text{masa osušenog drva}) / \text{masa osušenog drva} \times 100\%$$

Treba obratiti pozornost na to da u stvarnim situacijama točka zasićenja nikad nije dosegnuta po cijelom presjeku drva. Udio vlage smanjuje se od kore prema unutrašnjosti. Opadanjem sadržaja vlage ispod točke zasićenja, drvo će nastaviti gubiti vlagu dok se eventualno ne izjednači sa sadržajem vlage u zraku. To je također poznato kao točka ravnoteže vlage (EMC). Za bolje razumijevanje odnosa drva i vlage prikazan je dijagram smanjenja relativne vlažnosti smanjenjem ravnoteže vlažnosti zraka (Slika 4.) [12]



Slika 4. Dijagram relativne vlažnosti [12]

Ravnoteža vlažnosti počinje na 30% jer u toj točki prestaje „zeleni stadij“, tj. slobodna voda potpuno nestaje i počinje gubitak vezane vode. Time započinje proces utezanja drva. Na 100% relativne vlažnosti zraka drvo je potpuno zasićeno vezanom vodom, dok na 0% relativne vlažnosti zraka, drvo gubi svu vezanu vodu. Jednom kad se sva slobodna voda izgubi nemoguće je vratiti se i preći točku zasićenja (30%).

Za namještaj i ostale elemente interijera relativna vlažnost trebala bi sadržavati oko 8% ravnoteže vlažnosti što se postiže skladištenjem drva na prosječno 40-45% relativne vlažnosti zraka. Za projekte eksterijera točka od oko 12% ravnoteže vlažnosti je dobar kompromis, a to iznosi oko 65% relativne vlažnosti zraka [12].

Iz ove pretpostavke može se zaključiti da se u ovisnosti o primjeni drveno plastičnog kompozita vlažnost drva treba biti između 8% i 12%.

4. Drvno-plastični kompozit

Drvno plastični kompoziti su kompozitni materijali čiju matricu čini polimer, dok je drveni materijal ojačalo tj. punilo. Za izradu kompozita ne koriste se cijeli komadi drva već drveni ostatci, sekundarne sirovine tzv. piljevina ili drvno brašno. Listače i četinjače najčešće su vrste drva koje se koriste u izradi kompozita [13].

Prvi izrađeni kompoziti nisu imali vrlo dobra mehanička svojstva. Primjenjivali su se za izradu dekorativnih materijala koji ne zahtijevaju velika mehanička opterećenja. Brz razvoj novih verzija drvno plastičnih kompozita poboljšao je dimenzijsku stabilnost i mehanička svojstva uz mogućnost obrade, oblikovanja u složene oblike i spajanje s drugim materijalima. Oni su čvrsti, stabilni i mogu se ekstrudirati s velikim dimenzijskim tolerancijama.

Moderni drvno plastični kompoziti izrađuju se miješanjem drvnog brašna i polimera koji se mogu obrađivati kao polimeri, ali posjeduju svojstva polimera i drva. Drvno brašno se dobija iz piljevine i ostataka drvnih produkata što znači da nije potrebno korištenje dodatnih izvora. Otpadni produkti su jeftini izvor sirovina i predstavljaju vrijedan materijal. Uz to recikliranje se smatra i profitabilnim i etičkim jer ne dolazi do uništavanja šuma i korištenja svježih izvora. Plastični materijali mogu se dobiti recikliranjem plastičnih vreća i drugih izvora, iako se u posebnim zahtjevima pri izradi koriste novi polimerni materijali [13].

Drvno plastični kompoziti mogu se proizvesti u gotov proizvod procesom ekstrudiranja. Taj proces povećava efikasnost i omogućuje fleksibilan dizajn. To su proizvodi koji ne trebaju daljnju obradu. Mehanička i druga svojstva takvih proizvoda su zadovoljavajuća.

I drvo i plastika imaju svoje nedostatke, a kombiniranjem ta dva materijala postoji mogućnost uklanjanja međusobnih nedostataka. Drvno plastični kompoziti otporni su na vodu, atmosferlije i vlagu što je glavni nedostatak neobrađenog drva. Oni posjeduju vrijednost krutosti i čvrstoće koje su između vrijednosti za drvo i plastiku, a gustoća im je uglavnom veća. Njihova svojstva proizilaze direktno iz njihove strukture koju čine sitne čestice drva okružene polimernim materijalom.

Svojstva drvno plastičnih kompozita mogu biti prilagođena traženim zahtjevima proizvoda variranjem vrste drva i vrsta polimernog materijala. Prije ekstrudiranja u drvno plastične

kompozite mogu se dodati različiti pigmenti, UV stabilizatori i drugi dodaci kako bi se poboljšala specifična svojstva.

Područje primjene drvo plastičnih kompozita je široko. Najviše se primjenjuju u području građevine gdje se zahtjevaju produkti s veoma dobrim fizikalnim svojstvima. Osim u građevini (66% ukupne svjetske proizvodnje), primjenjuju se još u infrastrukturi (18%), te u transportu (10%) [14].

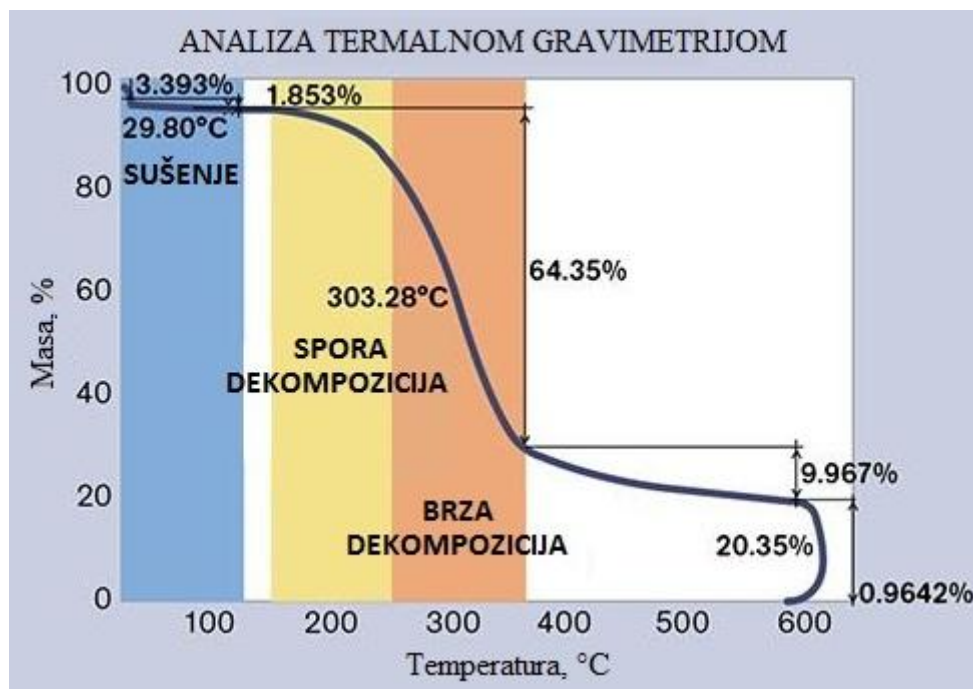
Na slici 5. mogu se vidjeti različiti primjeri primjene drvo plastičnih kompozita

Interijeri	Eksterijeri	Javni objekti	Transport
<ul style="list-style-type: none"> - okviri za vrata i komponente - okviri prozora i dijelovi - stepenice i rukohvati - oplata i profili za podove - pregradni zidovi - kuhinja i radne ploče - namještaj - harmonika vrata 	<ul style="list-style-type: none"> - vanjske vertikalne i horizontalne obloge - vrtni namještaj i arhitektura - zvučna izolacija fasada - ograde - stepeništa 	<ul style="list-style-type: none"> - oprema za dječja igrališta - klupe za parkove i ostala oprema - zaštitne ograde - pješački mostovi - podni profili 	<ul style="list-style-type: none"> - brodski podovi, dokovi i ograde - unutrašnje obloge vrata - poklopac motora - oslonci sjedišta - zadnje police - podovi za kamione i prikolice
			

Slika 5. Primjeri primjene drvo plastičnih kompozita

4.1. Toplinska svojstva drvo plastičnih kompozita

Toplinska svojstva drva iznimno su loša zbog njegove zapaljivosti i gorivosti. Toplinska nestabilnost drva ograničava temperaturu izrade drvo plastičnih kompozita na maksimalno 200°C. Iznad 190°C počinje degradacija celuloze i lignina. Degradacijom dolazi do gubitka mase što ograničava i otežava proces i kvalitetu ekstrudiranja, a time stvara nekvalitetan gotovi proizvod. Na slici 6. prikazan je gubitak mase drva pri određenim temperaturama.[15.]



Slika 6. Prikaz utjecaja temperature na sušenje i dekompoziciju drva [15]

Prisutnost plastične matrice poboljšava toplinska svojstva drvene komponente u drvo plastičnom kompozitu, ali zbog temperaturnih ograničenja važan je izbor adekvatnog polimernog materijala. Kod drvo plastičnih kompozita ponašanje pri gorenju određeno je svojstvima polimerne matrice. Drvo plastični kompozit pokazuje dobre rezultate pri testu zapaljivosti i oni su slični rezultatima za drvo sličnih gustoća. Svojstva gorenja mogu se modificirati dodavanjem usporivača gorenja u sirovi materijal [15].

4.2. Matrice drveno plastičnih kompozita

Zadatak matrice u drveno plastičnom kompozitu je da prijanja uz punilo i da kompozitu osigura određenu krutost i stabilnost. Za izradu se primjenjuju sintetički polimerni materijali koji se međusobno razlikuju prema kemijskom sastavu. Dijelev se na poliolefine, poliestere, poliamide, poliuretane, a prema strukturnoj građi makromolekule dijelev se na linearne razgranate i umrežene. Prema mehaničkim svojstvima dijelev se na poliplaste (plastična svojstva) i elastomere (elastična svojstva). Poliplasti se dijelev na plastomere (termoplaste) i duromere (termosete). Plastomeri su linearni, razgranati polimeri koji se mogu višestruko prerađivati u taljevini (ekstrudiranjem), dok prerada nema veće posljedice na svojstva. Za razliku od polimera duromeri se nemogu preoblikovati, već se izradom dobiju gotovi produkti. Kod proizvodnje drveno plastičnih kompozita koriste se isključivo polimeri, temperature prerade do 200°C (zbog toplinskih svojstava drva). U primjeni se najčešće koriste polietilen, polipropilen i u manjim količinama polistiren. Iako je temperatura od 200°C određena temperatura prerade ona nije apsolutna [2].

4.2.1. Polietilen

Polietilen (PE) najjednostavniji je polimerni ugljikovodik, industrijski proizveden polimerizacijom etilena. Spada u žilave materijale, voskastog izgleda i nepotpune prozirnosti. Struktura njegove makromolekule jednostavnog je sastava, a čine ga ponavljajuće jedinice etilena $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$. Spada u polukristalne polimere, a to znači da pri sobnoj temperaturi on sadrži dvije faze: kristalnu i amorfnu. Povećanjem udjela kristalne faze, povećava mu se i gustoća, temperatura taljenja i mehanička svojstva. Gustoća polietilena pokazatelj je odnosa kristalne i amorfne faze i neposredno određuje područje primjene pojedinih vrsta polietilena. Osnovne vrste polietilena, ovisno o granatosti makromolekula, razlikuju se po gustoći i svojstvima [2].

Polietilen visoke gustoće primjenjuje se kod materijala visoke krutosti, žilavosti i visoke kemijske postojanosti, dok se polietilen niske gustoće uglavnom upotrebljava za filmove debljine 10-250 µm, visoke savitljivosti i prozirnosti. Gustoća polietilena stopostotne amorfne strukture je oko 0,85 g/cm³, dok je gustoća stopostotne kristalne strukture 1,0 g/cm³. Stupanj kristalnosti polietilena ovisi o razgranatosti polimernog lanca i veličini molekulnih masa. Ono za polietilen visoke gustoće iznosi 60-80%, a za polietilen niske gustoće 40-50%. Preradljivost polietilena određena je masenim protokom taljevine, što predstavlja vrijednost

mase taljevina pri određenoj temperaturi koja prođe kroz sapnicu viskozimetra zadanog presjeka u vremenu od 10 min. Polietilen niže molekulne mase ima viši maseni protok taljevine.

Za komercijalnu proizvodnju koriste se polietilen visoke gustoće (PE-HD) i polietilen niske gustoće (PE-LD). Polietilen niske gustoće dobiven lančanom polimerizacijom posjeduje svojstva žilavosti, otpornosti na kidanje, otpornosti na kiseline i alkalije. Nedostatak mu je nepotpuna prozirnost. Polietilen visoke gustoće ima linearnu strukturu makromolekula, veću molekulsku masu, velik udio kristalne faze, te visoku gustoću i talište. To mu daje veliku čvrstoću i tvrdoću i znatno veću krutost od PE-LD.

Kako bi se drveno plastični kompozit bolje obradio materijal treba imati manju kristalnost. Ona ovisi o brzini hlađenja izrađenog profila, što utječe na skupljanje, lomljivost i unutarnja naprezanja. Dodatkom drvnog punila amorfnoj strukturi sprečava se slobodno gibanje velikih molekula i povećava stupanj urednosti sustava na nadmolekularnoj razini, uz povećanje temperature staklišta koje smanjuje preradivost plastomerne matrice [2].

4.2.2. Polipropilen

Polipropilen se sastoji od linearnih molekula s ponavljajućim merima $-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$. Sadrži svojstva slična polietilenu. Visoka čvrstoća, krutost, otpornost na više temperature, veća prozirnost, visoka otpornost na kidanje, dobra obrada i ravna površina karakteristike su ovog materijala. Znatno je krhkiji od polietilena, posebno pri nižim temperaturama. Struktura makromolekula razlikuje se s obzirom na orijentaciju metilnih skupina u osnovnoj ponavljajućoj jedinici propilena. U Europi se za proizvodnju drveno plastičnog kompozita koristi polipropilen u većoj mjeri, dok je za Sjevernu Ameriku karakterističnija uporaba polietilena. Toplinska ekspanzija oba materijala je podjednaka. Zbog toga je drveno plastični kompozit izrađen od bilo kojeg materijala podložan puzanju, posebno u uvjetima većih opterećenja i pri višim temperaturama. Dodavanjem aditiva postoji mogućnost ublaživanja puzanja [2].

4.3. Punila

Drvni produkti kao što su drveno brašno, piljevina, drvena vlakna osnovne su komponente drveno plastičnih kompozita. Veličina i oblik drvene komponente glavni su utjecajni faktori na krajnja tj. uporabna svojstva kompozita. Zbog toga je razvijen velik niz metoda pripreme drvnog materijala za drveno plastične kompozite. Izrada određenih vrsta vlakna i granulata spada pod najkomercijalnije i najupotrebljenije metode izrade. Drvena se vlakna dobivaju različitim metodama koje najčešće obuhvaćaju neku vrstu mehaničkog ili kemijskog razdvajanja cjelovitog drva. Tim postupcima mijenjaju se svojstva drva, a time i drveno plastičnih kompozita. Drvena vlakna spadaju u jedna od boljih punila za drveno plastične kompozite zbog velikog omjera duljine i promjera što uvjetuje visoku čvrstoću i mogućnost dobrog prijenosa naprezanja unutar matrice, ali zbog tehnoloških problema izrade drveno plastičnog kompozita primjenom drvnih vlakna kao punila, ona se rijetko primjenjuju. Glavni nedostatak je njihova duljina koja smanjuje mogućnost tečenja drvom ispunjenog plastičnog materijala pri preradi. Upravo zbog tih razloga primjenjuje se drveno brašno. Drveno brašno predstavlja drvo svedeno na sitne, razdvojene čestice koje izgledom, veličinom i strukturom podsjećaju na čestice brašna. To je relativno jeftin materijal i čini proces proizvodnje kompozita relativno jednostavnim. Drveno je brašno otpadni produkt iz pilanskih procesa koji je usitnjen. Također, može se dobiti recikliranjem upotrebljenih gotovih drvnih proizvoda. Ne postoji standardna metoda dobivanja drvnog brašna, već se korištenjem mlinova različitih promjera oka sita, prosijavanjem dobivaju različite veličine zrna. One su određene različitim normama [2].

Za proizvodnju drveno plastičnih kompozita upotrebljavaju se različite vrste drvnog brašna, a njihov izbor ponajviše ovisi o dostupnosti sirovine karakteristične za geografski položaj. Najčešće korišteni materijali su bor, smreka, javor i hrast, ali mogu se koristiti i druge vrste drva. Prednost se daje drvima sa manje tanina zbog podložnosti toplinskoj degradaciji. Kompoziti se proizvode pri temperaturi oko 200°C što je i temperatura razgradnje lignina i akcesorne tvari. One mogu uzrokovati nastajanje mikrošupljina što smanjuje gustoću kompozita, te njihova fizikalno-mehanička svojstva. Također postaju podložni biološkom propadanju. Uz to akcesorne tvari su lako topive u vodi, pa se migracijskim i sorpcijskim procesima mogu izlučiti na površini kompozita i stvoriti tamne mrlje. Tanini u kombinaciji sa solima željeza mogu uzrokovati potamnj enje na površini kompozitima pa kontakti s npr.

spojnicama ili čavlima mogu uzrokovati potamnjenje površine. Oksidacijom se mogu ukloniti te mrlje.

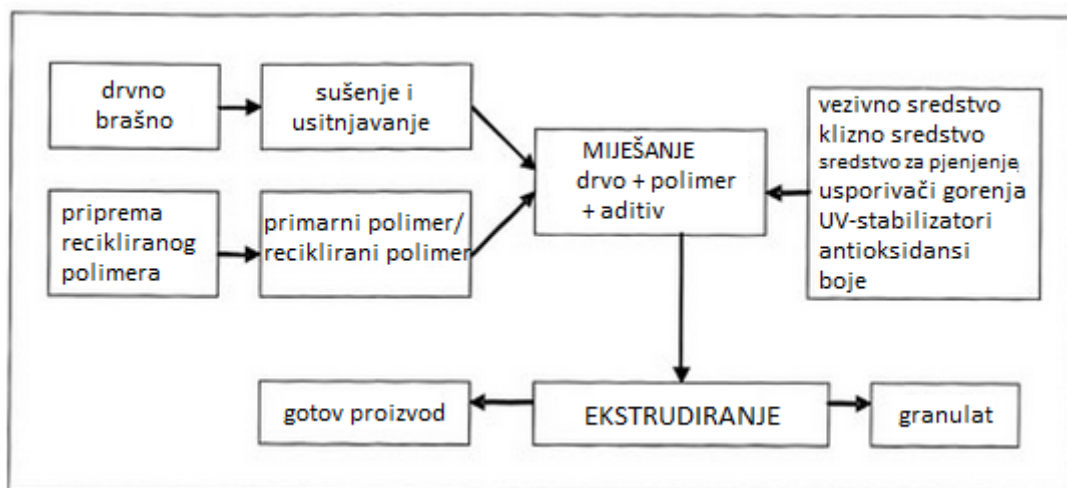
Svojstva drvnog brašna dosta se razlikuju od svojstava cjelovitog drva od kojeg su izrađeni. Postupak proizvodnje provodi se pri povišenom tlaku i/ili temperaturi. Mijenja se kemijska svojstva površine drva, njegova gustoća i sadržaj vode, te higroskopsnost drvene tvari. Npr. drvena vlakna proizvedena termomehaničkim putem imaju površinu obogaćenu ligninom, dok ona dobivena kemijskim putem imaju površinu bogatu ugljikohidratima. Jedan od najvažnijih faktora je povišena temperatura koja mijenja toplinska svojstva drvnih vlakna i brašna

Higroskopsnost drva je jedan od problema pri proizvodnji drveno plastičnih kompozita. Drveno brašno upija vlagu prije miješanja s polimerom, dok gotovi kompoziti dodatno upijaju vlagu iz okoline. Drvo u strukturi drveno plastičnog kompozita nije potpuno zaštićeno od vlage. Utezanje i bubrenje su posljedice djelovanja vlage, a ono je uvjetovano količinom drva u strukturi. Način proizvodnje drvnog brašna utječe na promjene u sadržaju vode i higroskopsnosti. S većim postotkom vlage drvnog brašna postoji i veća mogućnost opasnih spojeva, poroznosti, smanjenja gustoće i mogućnost daljnjeg upijanja vlage gotovog kompozita. Ako dolazi do bubrenja drva u kompozitu, veze između matrice i ojačala pucaju i stvaraju se mikropukotine. Reduciranjem udjela drvene tvari u ukupnoj masi drveno plastičnog kompozita može se regulirati vlaga.

Njihova mehanička svojstva razlikuju se najviše o vrsti drva, starosti, geografskom podrijetlu, načinu proizvodnje, te sadržaju vode. Veličina čestica također utječe na mehanička svojstva. Povećanjem dimenzija čestica povećava se i iznos rasteznog modula elastičnosti te maksimalan iznos savojne i rastezne čvrstoće drveno plastičnog kompozita. Stark i Rowlands (2003.) došli su do zaključka da je drveno brašno punilo koje samo djelomično utječe na čvrstoću kompozita, dok se drvena vlakna mogu upotrebljavati ne samo kao punilo, već i kao strukturni elementi čijom se dodatkom povećava čvrstoća i krutost [2].

4.4. Proizvodnja drveno plastičnih kompozita

Postoje mnogi procesi proizvodnje drveno plastičnog kompozita poput ekstrudiranja, injekcijskog prešanja, kalandriranja, toplog oblikovanja i pultrudiranja. U praksi se najviše primjenjuje ekstrudiranje. Postoji mogućnost proizvodnje punih i šupljih profila. Također postoji mogućnost korištenja ekstrudera s jednim ili dva pužna vijka. Na slici 7. možemo vidjeti shemu postupka proizvodnje drveno plastičnog kompozita ekstrudiranjem [16].



Slika 7. Shematski prikaz procesa ekstrudiranja [16]

1. Priprema drvnog brašna

Proces pripreme drvnog brašna sastoji se od usitnjavanja, sijanja i sušenja. Ti procesi služe kako bi drveno brašno postalo pogodno za kombinaciju s polimerom prije skrućivanja. Materijali koji se primjenjuju kao drveno brašno dolaze iz otpadnih proizvoda poput namještaja, piljevine i sl. Veličina čestice je u rasponu od 250 – 400 μm . Ponekad se prije usitnjavanja može provoditi sušenje ovisno o tehnološkom postupku. Usitnjeni materijal nanovo se suši kako bi se dosegla vlaga u rasponu od 0,5 - 8%. Sadržaj vlage bitno utječe na kvalitetu i primjenjivost gotovog proizvoda [16].

2. Miješanje s polimerom i aditivima

Ovisno o procesu može se i ne mora provoditi postupak homogenizacije. Sve ovisi o traženim svojstvima gotovog proizvoda. Polimer se dovodi u obliku granulata ili recikliranog materijala, a među najkorištenijim su PE, PP, PVC, te u manjoj mjeri PS, PU i ABS (akrilo

nitril-butadien stiren). Najčešće upotrebljeni materijal je PE koji se prije svega provodi kroz postupke recikliranja kako bi se oslobodio nečistoća. Tako usitnjen i osušen postaje spreman za daljnju preradu [16].

3. Ekstrudiranje

Kod konstrukcije dvopužnih ekstrudera najveći problem za preradu kompozita predstavlja doziranje ekstrudera zbog niske nasipne mase drvnog brašna i reciklirane PE-folije. Ovisno o načinu pripreme kompozita procesi doziranja se razlikuju. Kompozit se unosi u ekstruder na više načina [16]:

- kao pojedinačna praškasta/granulirana komponenta,
- kao praškasta mješavina polimera, drvnog brašna i aditiva,
- kao gotove granule kompozita.

Karakteristična svojstva za ekstrudiranje su:

- kontrolirana temperatura,
- stabilan povratni tlak tijekom ekstrudiranja,
- visoka fleksibilnost,
- širok know-how dizajn puževa,
- velik izbor puževa.

5. Eksperimentalni dio – izrada drvno plastičnih kompozita

Eksperimentalni rad sastojao se od izrade drvno plastičnih kompozita i ispitivanja njihovih mehaničkih svojstava. Za izradu kompozita koristila se matrica od polimera, točnije polietilena, dok su se za punilo koristile drvene čestice pet različitih vrsta drva: hrasta, bukve, smreke, tikovine i oraha. Varirana je i veličina čestica. Izrada drvno plastičnog kompozita, njegovo izrezivanje i ispitivanje provodilo se na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, na Zavodu za materijale. Najčešće se drvno plastični kompoziti izrađuju u masenom omjeru matrica:ojačalo 70:30, 60:40 i 50:50 ovisno o traženim svojstvima gotovog proizvoda, dok se za ovaj eksperiment radilo s volumnim udjelom u omjeru 50:50. Izrada drvno plastičnog kompozita nije provedena konvencionalnim postupcima, već su se svi postupci izrade odvijali ručno: mrvljenje drva, razdvajanje granulata, miješanje polimera i drvnih čestica, te kalupljenje. Time se pokušalo vidjeti postoje li kakve prednosti ili nedostaci, te svojstva gotovog produkta drvno plastičnog kompozita.

5.1. Priprema drvnog brašna

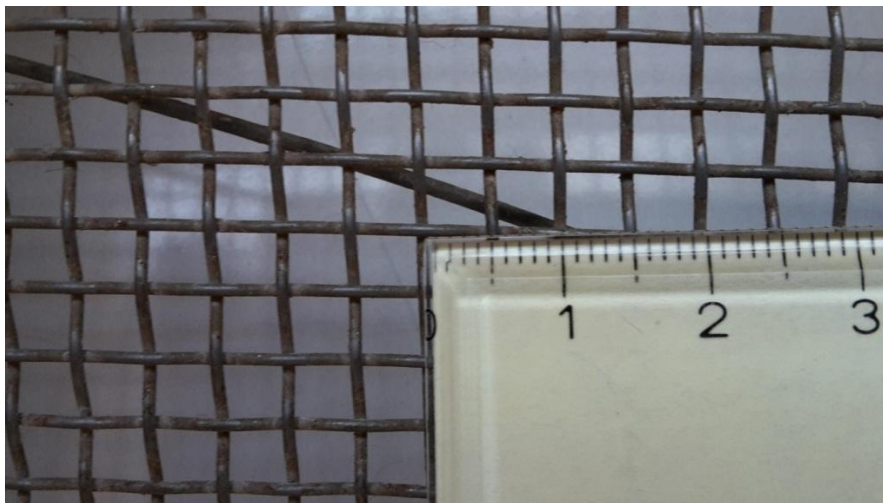
Kao ojačalo korištene su sitne čestice drva koje su se prethodnim postupcima prerađivale. Drvni materijal koji se koristio dobiven je iz stolarske radionice u Puli. Ondje je postupcima piljenja i rezanja drva nastao otpadni produkt - piljevina.

Drvena piljevina sastojala se od čestica različite veličine i nije bila pogodna za direktnu primjenu. Čestice drva trebalo je prethodno usitniti. Usitnjavanje se provodilo ručno, trljanjem piljevine između dlanova i ručnim drobljenjem kako bi se dobile što sitnije čestice.

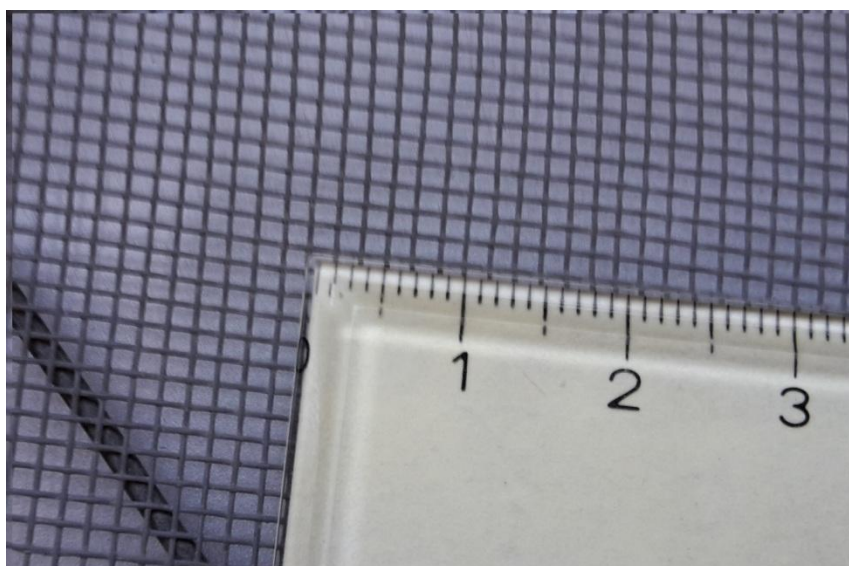
U sklopu eksperimenta uzorke je trebalo izraditi s dvije različite veličine čestica. Za prosijavanje dobivenog drvnog brašna korištena su dva sita sa različitom veličinom otvora. Prvo je drvni materijal prosijan kroz veće sito s otvorima od 5 mm. Zaostale čestice u situ odbačene su jer su bile prevelike za izradu drvno plastičnog kompozita. Prosijane čestice iz grubljeg sita, prosijane su dalje kroz finije sito s otvorima od 2 mm. Tako su dobivene dvije različite veličine čestica za izradu drvno plastičnih kompozita:

- krupnije čestice drva - između 2 mm i 5 mm,
- sitnije čestice drva - manje od 2mm

Na slikama 8. i 9. mogu se vidjeti dva sita s različitim veličinama otvora



Slika 8. Sito s otvorima veličine 5 mm



Slika 9. Sito s otvorima veličine 2 mm

Cijeli postupak proveden je pet puta za pet različitih vrsta drva. Nakon svakog prosijavanja sita su se temeljito čistila ispuhivanjem kako u sljedećim postupcima prosijavanja drugih vrsta drva ne bi došlo do miješnja različitih drvnih čestica. Kao finalni produkt dobiveno je deset različitih vrsta punila.

Na slici 10. prikazana su sva punila s naznačenim vrstama drva.



Slika 10. Prosijani uzorci različitih vrsta drva različitih veličina čestica

5.2. Izrada drveno plastičnog kompozita

Kao matrica drveno plastičnog kompozita koristio se polietilen gustoće $1,21 \text{ g/cm}^3$. Kao punilo korištene su drvene čestice opisane u prethodnom poglavlju. Gustoće punila varirale su u ovisnosti o vrsti drva. U tablici 2. mogu se vidjeti vrijednosti gustoće korištenih vrsta drva. Na taj način dobiveno je deset različitih uzoraka drveno plastičnih kompozita. Na njima su provedena sva predviđena ispitivanja.

Tablica 2. Gustoća korištenih vrsta drva

DRVNO BRAŠNO	GUSTOĆA (g/cm^3)
Hrast	0,80
Bukva	0,65
Smreka	0,45
Tikovina	0,6
Orah	0,57

Kako postupak nije izrađen konvencionalnim metodama i kako se kompozit nije radio preko masenih omjera, iz gustoća je bilo potrebno izračunati koliki će udio mase svakog drva biti potreban kako bi se dobio volumni omjer 50:50 za različite vrste kompozita. Zadani ukupni volumen bio je $V_u = 0,15 \text{ dm}^3$, što znači da je volumni udio smole/polimera i volumni udio punila bio jednak, točnije $V_s = V_{db} = 0,075 \text{ dm}^3$.

Formula za izračun mase pomoću gustoće i volumena je:

$$\bullet \quad m = \frac{\rho}{V} [g]$$

gdje je: ρ – gustoća, $[\text{kg/m}^3]$,

V – volumen $[\text{m}^3]$.

Zbog nedovoljne količine drvnog brašna krupnih i sitnih čestica, te veličine kalupa, željeni volumen morao je biti smanjen a time se trebala smanjiti i masa smole koja bi se koristila. U tablici 3. može se vidjeti masa svih vrsta drva i masa polietilenske smole.

Tablica 3. Mase komponenata za izradu uzoraka

DRVNO BRAŠNO/SMOLA	SITNE ČESTICE	KRUPNE ČESTICE
Hrast	6 g	12 g
Bukva	4,88 g	9,8 g
Smreka	3,38 g	6,8 g
Tikovina	4,5 g	9 g
Orah	4,28 g	8,6 g
Smola/Polietilen	9,08 g	18,1 g

Iz prethodne tablice jasno se može vidjeti da se koristilo dvostruko više drvnog brašna i smole kod izrade drveno plastičnih kompozita s krupnijim česticama. Unatoč svemu navedenom, volumni omjer matrice i punila kod svih uzoraka bio je jednak.

Kao kalup za miješanje i izradu drveno plastičnih kompozita koristile su se posude od polipropilena. Razlog korištenja polipropilenskog kalupa je taj što bi polietilenska smola reagirala s bilo kojim drugim kalupom izrađenim npr. od polietilena. Za izradu i miješanje

drveno plastičnih kompozita krupnijih čestica koristio se kalup većih dimenzija dok se za izradu i miješanje drveno plastičnih kompozita sitnijih čestica koristio kalup manjih dimenzija zbog ograničenosti sastojaka (slika 11. i slika 12.)



Slika 11. Kalup korišten za drveno plastični kompozit ojačan krupnim česticama

Prvo se u kalup ulila izmjerena masa polimerne smole. Smoli su zatim dodane čestice drva. Keramičkim štapićem je miješana smjesa, a kroz proces mješanja dodan je katalizator (1% od ukupne mase kompozita). Katalizator ili aktivator ima svrhu ubrzivanja kemijskih reakcija u procesu tj. aktivira i ubrzava stvrdnjavanje kompozita. Nakon dodavanja katalizatora smjesa se nastavila mješati dok golim okom cijela smjesa nije izgledala homogeno kroz cijeli kalup. Isti proces se ponovio za sve uzorke. Nakon toga uzorci su ostavljeni da se osuše i stvrdnu.

5.3. Izrezivanje uzoraka

Za izrezivanje uzoraka za ispitivanje savojne čvrstoće potrebno je poznavati ISO norme za određena ojačala kako bi se uzorak mogao izrezati na određeni oblik i dimenzije. Kod drveno plastičnih kompozita ojačanog drvnim brašnom primjenjuje se norma ISO 178. Uzorcima je izmjerena debljina te se prema normi izračunala duljina i širina uzorka na sljedeći način:

- za debljinu $3 < h < 5$ (mm) $\rightarrow b = 10$ mm,
- za debljinu $5 < h < 10$ (mm) $\rightarrow b = 15$ mm.

Za izračunavanje duljine koristi se sljedeća formula:

- $\frac{l}{h} = 20 \pm 1$

gdje je: l – duljina epruvete

h – debljina epruvete

b – širina epruvete

U tablici 4. i 5. mogu se vidjeti proračunate vrijednosti za izradu uzoraka za ispitivanje savojne čvrstoće

Tablica 4. Izračunate vrijednosti za kompozite s manjim česticama

Drvno brašno/ sitnije čestice	debljina h , mm	širina b , mm	duljina l , mm
Hrast	6	15	120
Bukva	5,5		110
Tikovina	5,5		110
Smreka	5,5		110
Orah	6		120

Tablica 5. Izračunate vrijednosti za kompozite s većim česticama

Drvno brašno/ sitnije čestice	debljina h , mm	širina b , mm	duljina l , mm
Hrast	3,5	10	70
Bukva	3		60
Tikovina	3		60
Smreka	3		60
Orah	3,5		70

Nakon proračunavanja uzorci su podvrgnuti rezanju na stroju za piljenje. Uzorci su izrezivani ručnom strojnom pilom (slika 13.)



Slika 12. Izrezivanje uzoraka

Od svakog drvno plastičnog kompozita izrezano je po tri primjerka pomoću kojih se ispitivala savojna čvrstoća. Isti ti uzorci nakon ispitivanja savojne čvrstoće korišteni su za ispitivanje tvrdoće pomoću utiskivanja kuglice.

Na slikama 14. – 18. mogu se vidjeti uzorci izrezani za ispitivanje drvno plastičnog kompozita sa sitnijim česticama



Slika 13. Kompozit sa sitnim česticama hrasta



Slika 14. Kompozit sa sitnim česticama bukve



Slika 15. Kompozit sa sitnim česticama tikovine



Slika 16. Kompozit sa sitnim česticama smreke



Slika 17. Kompozit s sitnim česticama oraha

Na slikama 19. – 23. mogu se vidjeti uzorci izrezani za ispitivanje WPC-a sa krupnijim česticama



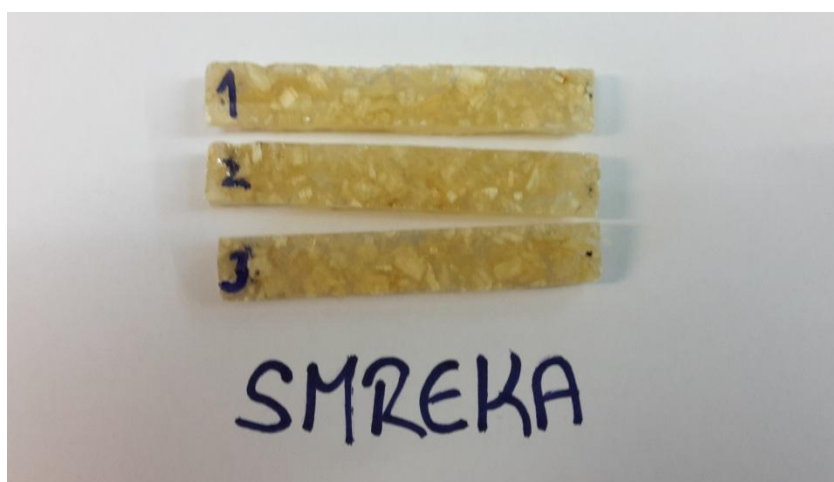
Slika 18. Kompozit s krupnim česticama hrasta



Slika 19. Kompozit s krupnim česticama bukve



Slika 20. Kompozit s krupnim česticama tikovine



Slika 21. Kompozit s krupnim česticama smreke



Slika 22. Kompozit s krupnim česticama oraha

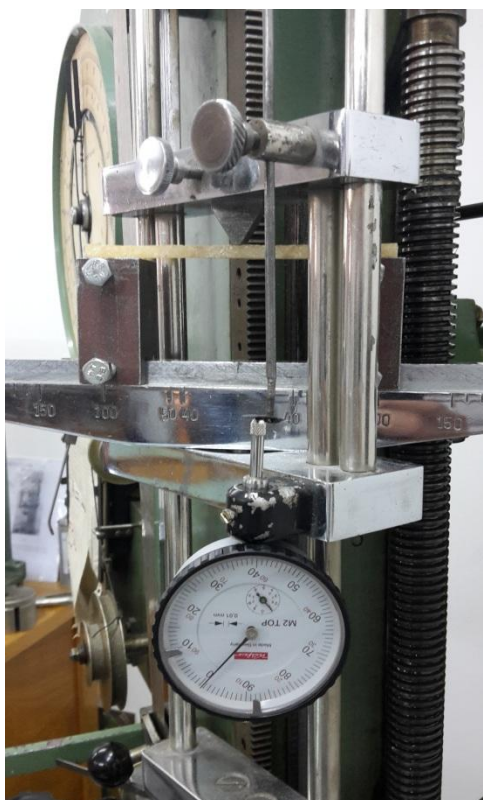
6. Ispitivanje mehaničkih svojstava

U okviru ovog rada ispitana su sljedeća mehanička svojstva na uzorcima drveno plastičnih kompozita:

- savojni modul elastičnosti,
- savojna čvrstoća,
- tvrdoća.

6.1. Ispitivanje savojne čvrstoće

Ispitivanje savojne čvrstoće provedeno je u Laboratoriju za polimere i kompozite u Zavodu za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno prema normi EN ISO 178. Za svaki uzorak izrezane su po tri epruvete četvrtastog poprečnog presjeka s dimenzijama prikazanim u tablici 4. i tablici 5. Savojna čvrstoća ispitivala se na univerzalnoj kraljici (slika 24.) savijanjem u tri točke.



Slika 23. Univerzalna kraljica

Kidalica je opremljena mjernim satom koji očitava progib epruvete pri zadanom opterećenju. Očitana je maksimalna sila pomoću koje se izračunavala savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti prema izrazima:

- Savojna čvrstoća: $R_{max} = \frac{3}{2} * \frac{F_{max} * l}{b^2 * h}, [\frac{N}{mm^2}]$

gdje je: F_{max} – maksimalna očitana sila, [N]

l – razmak između oslonaca, [mm] – $(16 * h_s)$

- Savojni modul elastičnosti: $E = \frac{l^3}{4b^3 * h} * \frac{\Delta F}{\Delta f}, [\frac{N}{mm^2}]$

gdje je: ΔF - prirast sile, [N]

Δf - progib, [mm]

6.2. Ispitivanje tvrdoće metodom utiskivanja kuglice

Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za polimere i kompozite na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Tvrdoćom se smatra otpornost ispitivanog materijala prema prodiranju drugog tvrdog materijala u njega. Ispitivanje je provedeno prema normi EN ISO 2039-1. Na svakom uzorku provedeno je deset mjerenja. Pri ispitivanju se očitava dubina prodiranja kuglice nakon 10s, 30s i 60s. U materijal se utiskivala kuglica promjera 5 mm od kaljenog čelika. Tvrdoća se računa prema izrazu:

- Tvrdoća: $H = 0,064 * \frac{F}{h}, [\frac{N}{mm^2}]$

gdje je: F – sila kojom je opterećena kuglica, [N]

h – izmjerena dubina prodiranja, [mm]

0,064 – izračunata konstanta $\frac{1}{D\pi}$, [mm⁻¹]

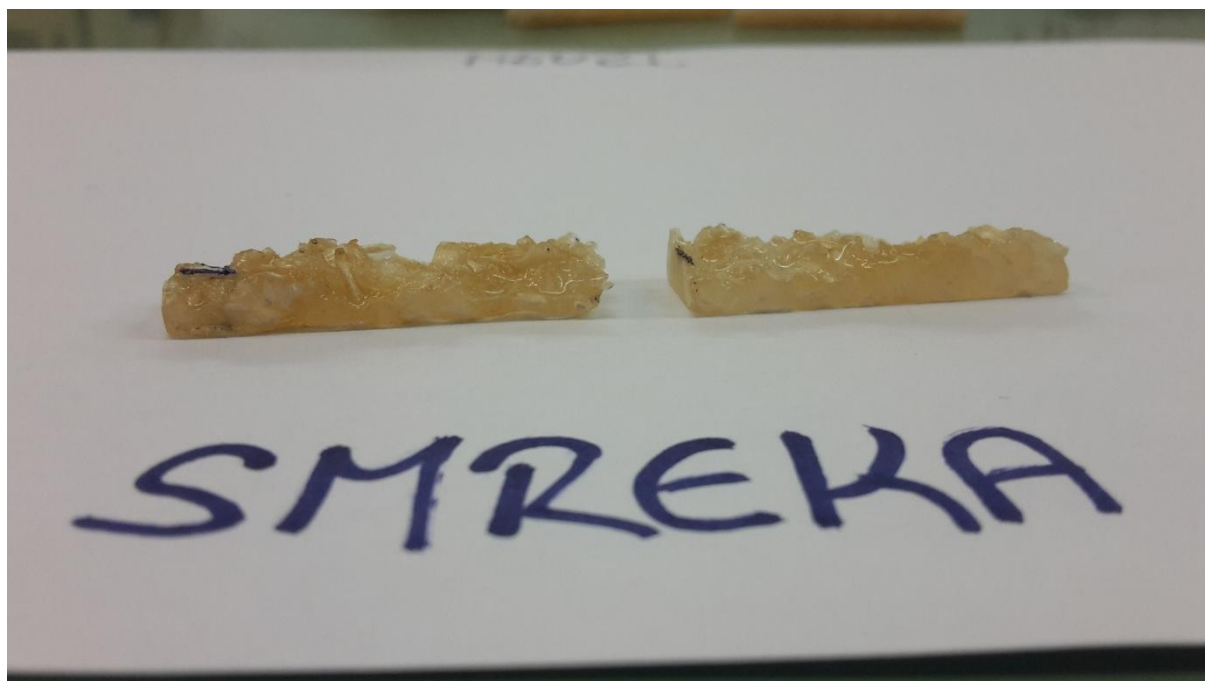
7. Rezultati

Za vrijeme ispitivanja mehaničkih svojstava bilježeni su podaci koji su pomoću gornjih izraza služili za izračun. Dobiveni rezultati prikazani su u tablicama i grafovima.

7.1. Savojna čvrstoća i modul elastičnosti

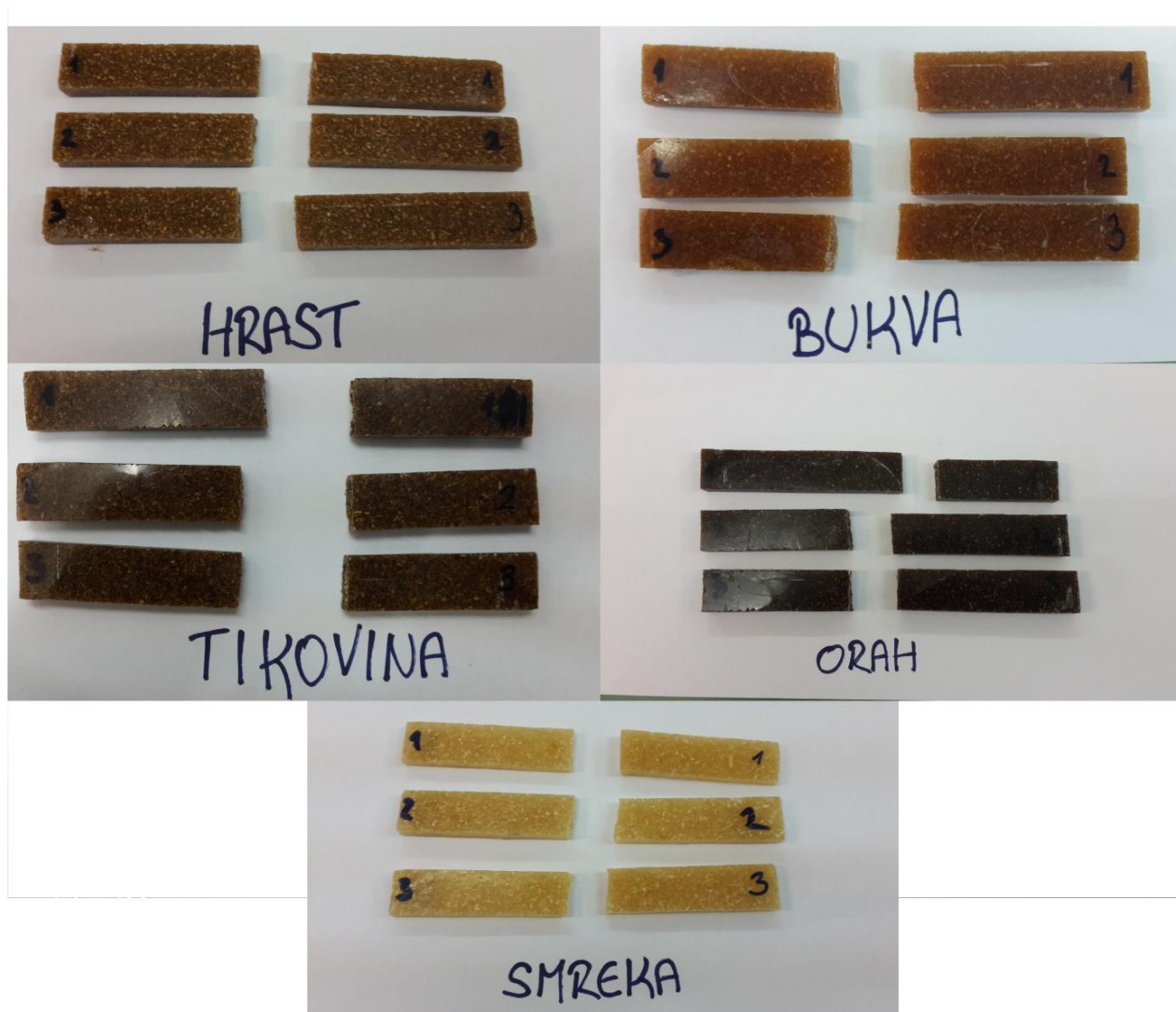
Savojna čvrstoća ispitivala se na univerzalnoj kidalici prema normi HRN EN ISO 178 savijanjem u tri točke. Proces se provodio pri sobnoj temperaturi od 20°C. Razmak između oslonaca ovisio je o debljini svakog uzorka.

Prilikom ispitivanja savojne čvrstoće uzoraka većih čestica došlo je do preranog pucanja izrezane epruvete. Kao što se može vidjeti na slici 26. površina jedne strane epruvete je neravna zbog nekonvencionalne metode izrade drveno plastičnog kompozita i razlike u neravninama su prevelike za bilo kakvo ispitivanje. Ispitivanje je provedeno samo na uzorcima izrađenim od sitnijih čestica drva.



Slika 24. Uzorak s krupnijim česticama nakon ispitivanja savojne čvrstoće

Ispitivanje savojne čvrstoće uzoraka sa sitnijim česticama provedeno je uspješno za razliku od uzoraka s većim česticama (slika 27.)



Slika 25. Uzorci nakon ispitivanja savojne čvrstoće

U tablici 6, 7, 8, 9 i 10 prikazane su izračunate vrijednosti za savojnu čvrstoću svih uzoraka sa sitnim česticama drva

Tablica 6. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama - tikovina

F, N	f1, mm	f2, mm	f3, mm
4	0,16	0,14	0,18
8	0,29	0,27	0,3
12	0,44	0,34	0,46
16	0,57	0,4	0,61
20	0,63	0,52	0,8
24	0,78	0,64	0,96
28	0,96	0,75	1,1
32	1,1	0,89	1,27
36	1,22	0,97	1,44
40	1,38	1,03	1,6
44	1,5	1,15	1,75
48	1,71	1,25	1,94
52	1,88	1,36	2,03
56	2,05	1,48	2,24
60	2,22	1,67	2,43
64	2,44	1,72	2,59
68	2,6	1,85	2,75
b, mm	14,94	15,12	15,12
h, mm	5,82	5,94	5,82
l, mm	110	110	110
L, mm	94	94	94
Fmax, N	68	130	80
Rmv, N/mm ²	18,94	34,35	22,02
E, N/mm ²	1849,24	2452,42	1734,8

Tablica 7. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama – hrast

F, N	f1, mm	f2, mm	f3, mm
4	0,11	0,09	0,2
8	0,17	0,16	0,31
12	0,27	0,24	0,4
16	0,32	0,31	0,49
20	0,42	0,46	0,57
24	0,49	0,56	0,67
28	0,6	0,65	0,78
32	0,68	0,79	0,9
36	0,79	0,98	1,01
40	0,88	1,08	1,11
44	0,98	1,17	1,2
48	1,06	1,27	1,28
52	1,15	1,39	1,38
56	1,25	1,48	1,48
60	1,38	1,58	1,58
64	1,5	1,66	1,69
68	1,6	1,76	1,78
b, mm	15,18	15,24	14,96
h, mm	5,74	5,66	5,88
l, mm	120	120	120
L, mm	92	92	92
Fmax, N	118	130	124
Rmv, N/mm ²	32,55	36,74	33,08
E, N/mm ²	2912,65	2699,8	2592,76

Tablica 8. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama – bukva

F, N	f1, mm	f2, mm	f3, mm
4	0,12	0,11	0,25
8	0,21	0,23	0,35
12	0,31	0,35	0,47
16	0,43	0,49	0,58
20	0,59	0,65	0,73
24	0,73	0,78	0,85
28	0,82	0,91	0,96
32	0,93	1,01	1,1
36	1,06	1,13	1,25
40	1,23	1,26	1,4
44	1,33	1,38	1,49
48	1,47	1,5	1,59
52	1,58	1,6	1,7
56	1,69	1,72	1,86
60	1,86	1,88	2,06
64	2	2,04	2,15
68	2,12	2,18	2,3
b, mm	15,2	15,04	14,98
h, mm	5,42	5,2	5,92
l, mm	110	110	110
L, mm	88	88	88
Fmax, N	106	98	126
Rmv, N/mm ²	31,33	31,8	31,68
E, N/mm ²	2252,66	2490,8	1711,34

Tablica 9. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama – orah

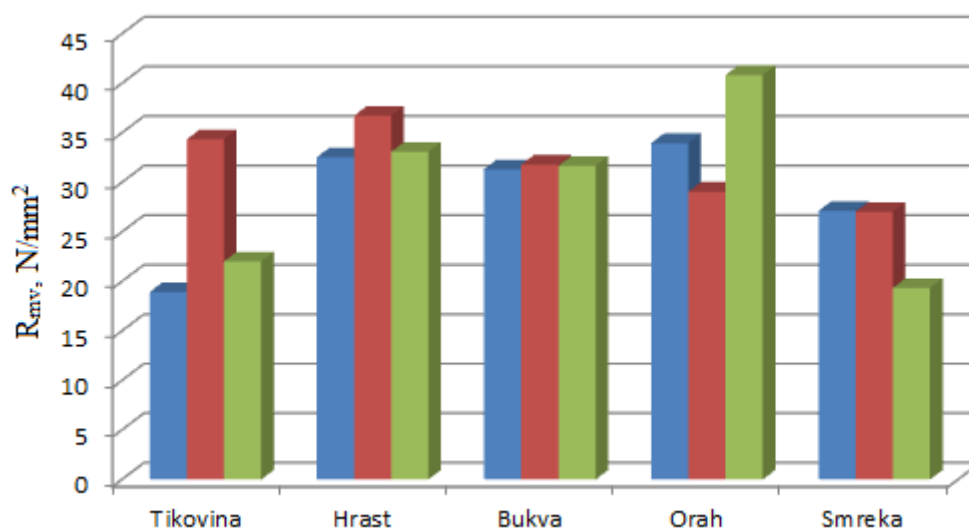
F, N	f1, mm	f2, mm	f3, mm
4	0,12	0,1	0,12
8	0,22	0,2	0,21
12	0,33	0,31	0,31
16	0,43	0,39	0,46
20	0,52	0,47	0,58
24	0,64	0,58	0,69
28	0,72	0,71	0,8
32	0,9	0,8	0,89
36	1	0,9	0,99
40	1,11	0,99	1,11
44	1,2	1,1	1,2
48	1,3	1,18	1,28
52	1,43	1,29	1,42
56	1,52	1,43	1,51
60	1,62	1,51	1,62
64	1,73	1,6	1,71
68	1,83	1,7	1,85
b, mm	15	15,24	15,18
h, mm	5,84	5,8	5,7
l, mm	120	120	120
L, mm	92	92	92
Fmax, N	126	108	146
Rmv, N/mm ²	33,98	29,07	40,85
E, N/mm ²	2438,69	2618,75	2561,77

Tablica 10. Vrijednosti savojne čvrstoće za uzorke sa sitnijim česticama – smreku

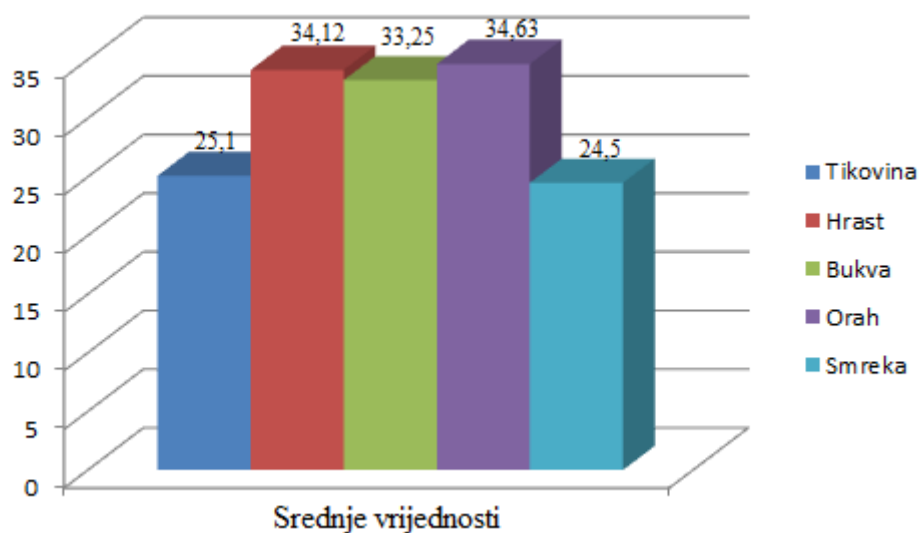
F, N	f1, mm	f2, mm	f3, mm
2	0,09	0,13	0,12
4	0,35	0,18	0,25
6	0,46	0,28	0,31
8	0,65	0,33	0,38
10	0,77	0,43	0,48
12	0,9	0,48	0,59
14	1,1	0,54	0,69
16	1,25	0,58	0,8
18	1,32	0,68	0,88
20	1,44	0,73	0,97
22	1,54	0,83	1,08
24	1,68	0,9	1,16
26	1,81	0,95	1,26
28	1,99	1	1,38
30	2,14	1,1	1,55
32	2,25	1,15	1,64
34	2,38	1,23	1,73
b, mm	15,52	15,38	15,2
h, mm	3,84	4,68	4,44
l, mm	110	110	110
L, mm	69	69	69
Fmax, N	60	88	56
Rmv, N/mm ²	27,13	27,03	19,34
E, N/mm ²	1305,91	1515,48	1226,92

Rezultati dobiveni u ovim tablicama prikazani su i grafički, za pet različitih vrsta drva po tri različita uzorka. Na slici 28. i 30. mogu se vidjeti usporedbe savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti za svih pet različitih vrsta uzoraka, dok su na slici 29. i 31. prikazane usporedbe srednjih vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti.

Grafičkim prikazom na slici 29. mogu se uočiti odstupanja u savojnoj čvrstoći za pojedine vrste drva. Također, grafičkim prikazom na slici 30. mogu se uočiti odstupanja i u modulu elastičnosti u epruvetama za pojedine vrste drva.

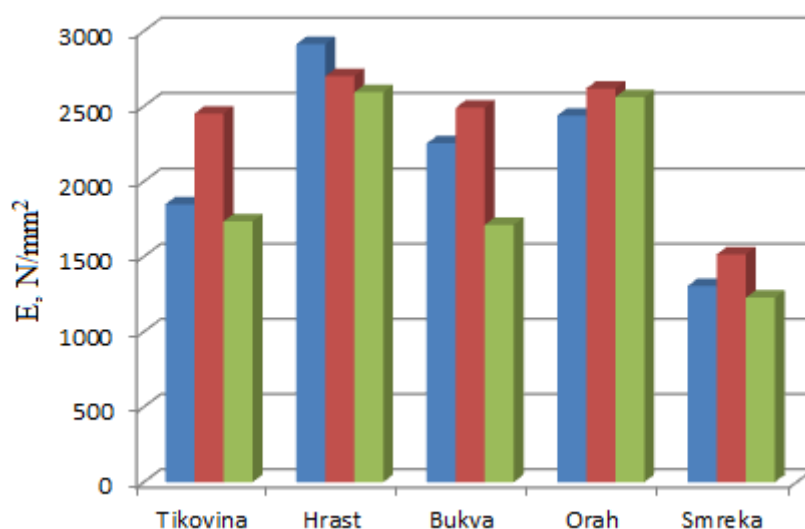


Slika 26. Dijagram savojnih čvrstoća za različite vrste drva za tri epruvete

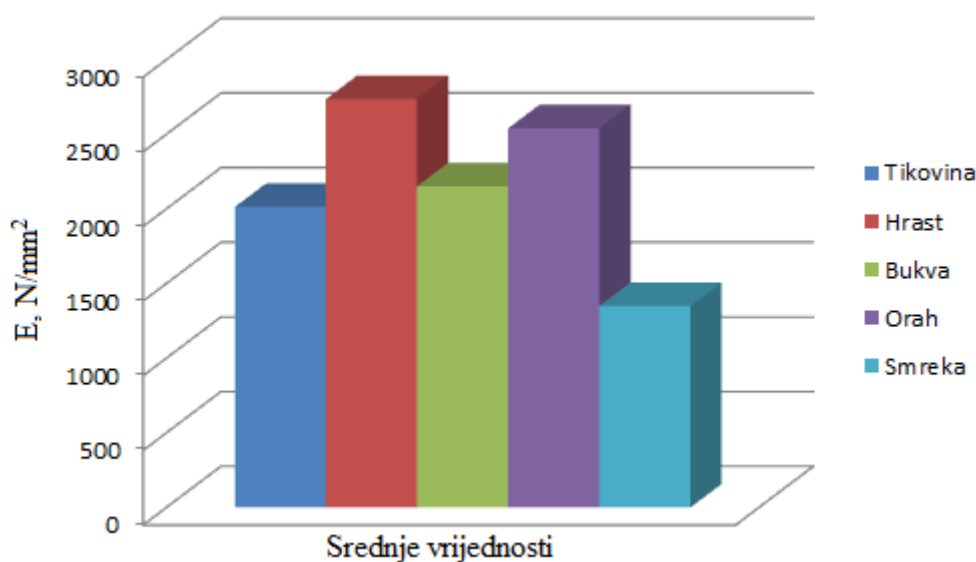


Slika 27. Dijagram srednjih vrijednosti savojnih čvrstoća

Iz slike 28. može se zaključiti da najmanje rasipanje vrijednosti ima kompozit ojačan česticama bukve. Mala rasipanja vrijednosti ima kompozit ojačan česticama hrasta, a ostali kompoziti imaju puno veća rasipanja vrijednosti savojne čvrstoće. Iz dijagrama sa slike 29. može se vidjeti da kompoziti ojačani česticama bukve, hrasta i oraha, imaju približno slične srednje vrijednosti savojnih čvrstoća dok su za kompozite ojačane česticama tikovine i smreke nešto niže.



Slika 30. Vrijednosti savojnog modula elastičnosti



Slika 31. Srednje vrijednosti modula elastičnosti

Na slici 30. prikazane su vrijednosti savojnog modula elastičnosti. Na slici se vidi da mala rasipanja vrijednosti imaju kompoziti ojačani česticama hrasta, oraha i smreke, dok su rasipanja vrijednosti za kompozite ojačanih česticama tikovine i bukve viša. Najvišu srednju vrijednost savojnog modula elastičnosti ima kompozit ojačan česticama hrasta, nešto niže vrijednosti ima kompozit ojačan česticama oraha, a najniže vrijednosti su kod kompozita ojačanog česticama smreke, slika 31.

7.2. Tvrdća

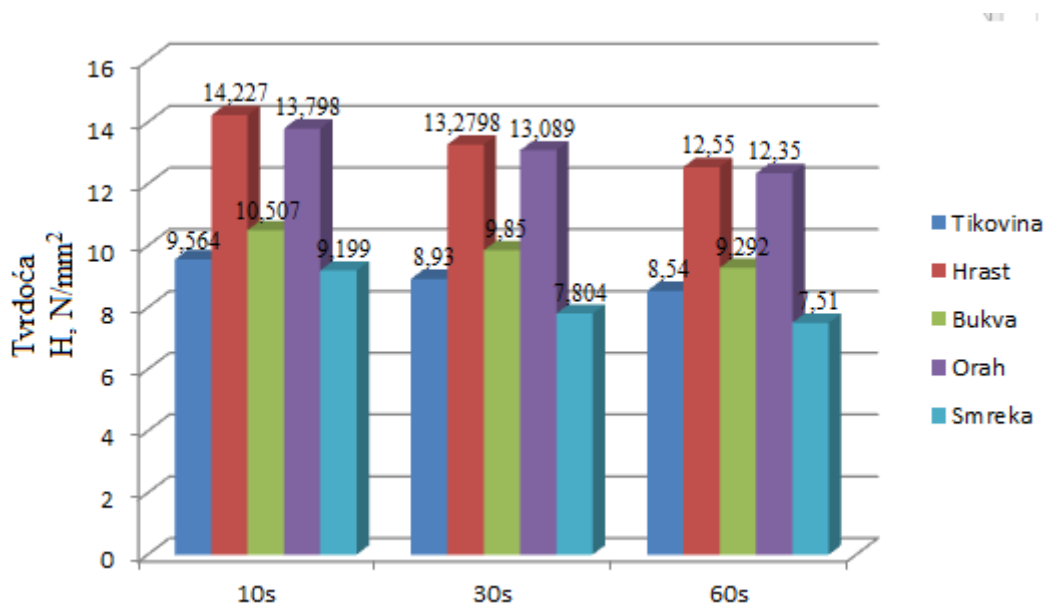
Ispitivanje je provedeno na uređaju za mjerenje tvrdoće kuglicom prema normi EN ISO 2039-1. Kuglica je izrađena od kaljenog čelika, promjera 5 mm. Pri mjerenju se očitava dubina prodiranja kuglice nakon 10, 30 i 60 sekundi djelovanja opterećenja. Korektura uređaja iznosila je – 0,020 mm što se oduzimalo od svih očitanih vrijednosti. Sila je iznosila 35,8 N. U tablici 11. prikazane su izračunate vrijednosti za svih pet vrsta ojačala.

Tablica 11. Tvrdća za različite vrste kompozita ojačanih česticama drva

OJAČALO	Tvrdća H, N/mm ²		
	10 s	30 s	60 s
Tikovina	9,564	8,93	8,54
Hrast	14,227	13,279	12,55
Bukva	10,507	9,85	9,292
Orah	13,798	13,089	12,35
Smreka	9,199	7,804	7,51

Na slici 32. grafički su prikazani rezultati mjerenja tvrdoće za sve uzorke. Sa slike se može vidjeti da kompozit ojačan česticama hrasta ima najveću tvrdoću. Malo niže vrijednosti tvrdoće ima kompozit ojačan česticama oraha. Kompozit ojačan česticama smreke ima najniže vrijednosti tvrdoće.

Kod svih ispitivanih uzoraka uočen je podjednak pad tvrdoće s produljenjem vremena opterećenja.



Slika 32. Usporedbe tvrdoća različitih vrsta drva za različita vremena mjerenja

Rasipanja vrijednosti pri mjerenju tvrdoće bila su velika kod svih uzoraka. Najveća rasipanja bila su kod kompozita ojačanog česticama bukve. Razlika dubine prodiranja (h) nakon desete sekunde ispitivanja iznosila je 0,235 mm. Kompozit ojačan česticama tikovine također je imao velika rasipanja vrijednosti dubine prodiranja, a kod ostalih kompozita razlike u dubini prodiranja bile su puno niže.

Uzrok ovom velikom rasipanju rezultata nalazi se u nehomogenosti ispitivanog materijala. Na mjestima gdje je gustoća drvnih čestica bila manja, tvrdoća je bila veća i obrnuto. Polimerna smola i drvene čestice nisu idealno izmješani što je uzrok velikog rasipanja vrijednosti tvrdoće.

8. Zaključak

Cilj završnog rada bio je utvrditi savojnu čvrstoću i modul elastičnosti, te tvrdoću izrađenih drveno plastičnih kompozita, te na temelju dobivenih rezultata donijeti zaključke.

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Savojna čvrstoća svih uzoraka je relativno niska. Najviše vrijednosti su dobivene kod kompozita ojačanih česticama oraha i hrasta, a najniže kod kompozita ojačanih česticama smreke. Kod većine uzoraka prisutna su velika rasipanja vrijednosti savojne čvrstoće.
- Savojni modul elastičnosti najviši je kod kompozita ojačanih česticama hrasta i oraha, a najniže vrijednosti ima kompozit ojačan česticama smreke. Rasipanja vrijednosti i ovdje su velika.
- Najvišu tvrdoću imaju kompoziti ojačani česticama hrasta i oraha, a najmanju kompoziti ojačani česticama smreke. Pad tvrdoće s produljenjem vremena opterećenja podjednak je kod svih ispitivanih uzoraka. Rasipanja vrijednosti bila su velika kod svih uzoraka, a najveća kod kompozita ojačanog česticama bukve.

Iz ovog rada može se zaključiti da za izradu drveno plastičnog kompozita korištenje nekonvencionalnih metoda ne rezultira izradom kvalitetnog drveno plastičnog kompozita koji bi se mogao primjenjivati u tehničke svrhe. Potrebno je koristiti konvencionalne metode poput ekstrudiranja kako bi se dobila homogena struktura i bolja mehanička svojstva.

Jednostavna proizvodnja i mogućnost nabavljanja jeftinih sastojaka vrlo je potrebna u današnjem razdoblju gdje iz dana u dan ponestaje prirodnih sirovina. Uvjetovanje održivog razvoja njihova je glavna prednost u odnosu na ostale materijale. Kod proizvodnje polimera s prirodnim vlaknima upravo drvo zauzima najveći postotak kao sirovine za upotrebu zbog njegove dostupnosti. Uz visoku dostupnost sastojaka, drvni kompoziti odlikuju se relativno lijepim dekorativnim izgledom, te će se uvijek moći primjenjivati za dizajn interijera stambenih objekata i prijevoznih sredstava, te u eksterijerima kao što su parkovi, dvorišta kuća, mostovi i slično.

Popis literature:

- [1.] <http://hr.wikipedia.org/wiki/Recikliranje>
- [2.] N. Španić, V. Jambreković, A. Antonović: „Osnovni materijali za proizvodnju drveno plastičnih kompozita“
- [3.] <http://www.greentins.com/doc/EINWOOD%20Catalog.pdf>
- [4.] T. Filetin, G. Marić: „Postupci proizvodnje kompozita“, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prezentacija
- [5.] http://rubber-products.com.mk/documents/doc_download/56-10-polimerni-materijali-electrolux.html
- [6.] P. Raos, M. Šercer: „Proizvodnja i primjena polimernih proizvoda“, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prezentacija
- [7.] http://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo_%28materijal%29
- [8.] <http://www.gradimo.hr/clanak/drvo-i-njegova-primjena/348>
- [9.] http://en.wikipedia.org/wiki/Wood_economy
- [10.] http://hr.wikipedia.org/wiki/Drvo_%28materijal%29
- [11.] V. Rede: „Drvo“, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prezentacija
- [12.] <http://www.wood-database.com/wood-articles/wood-and-moisture/>
- [13.] http://www.tangram.co.uk/TI-Wood_Plastic_Composites_Review.pdf
- [14.] K. Gašparić: „Diplomski rad“, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2011.
- [15.] <http://www.ptonline.com/articles/wood-plastics-composites-done-right>
- [16.] http://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/367/820/kompoziti_drvo-plastika_%E2%80%93_mogu%28%29nosti_kombinovanja_plastike_i_drveta

Prilog 1. Dubina prodiranja pri ispitivanju tvrdoće za drveni kompozit ojačan česticama tikovine

Redni broj očitavanja	10 sekundi	30 sekundi	60 sekundi
1	0,215 mm	0,230 mm	0,240 mm
2	0,215 mm	0,230 mm	0,245 mm
3	0,320 mm	0,345 mm	0,355 mm
4	0,165 mm	0,180 mm	0,190 mm
5	0,225 mm	0,240 mm	0,250 mm
6	0,155 mm	0,165 mm	0,175 mm
7	0,315 mm	0,340 mm	0,355 mm
8	0,290 mm	0,305 mm	0,320 mm
9	0,245 mm	0,260 mm	0,270 mm
10	0,250 mm	0,270 mm	0,280 mm
Srednja vrijednost	0,2195 mm	0,2365 mm	0,248 mm

Prilog 2. Dubina prodiranja pri ispitivanju tvrdoće za drveni kompozit ojačan česticama hrasta

Redni broj očitavanja	10 sekundi	30 sekundi	60 sekundi
1	0,115 mm	0,130 mm	0,145 mm
2	0,155 mm	0,160 mm	0,165 mm
3	0,145 mm	0,160 mm	0,165 mm
4	0,140 mm	0,150 mm	0,160 mm
5	0,160 mm	0,180 mm	0,190 mm
6	0,180 mm	0,190 mm	0,200 mm
7	0,145 mm	0,155mm	0,165 mm
8	0,165 mm	0,175 mm	0,190 mm
9	0,230 mm	0,240 mm	0,250 mm
10	0,175 mm	0,185 mm	0,195 mm
Srednja vrijednost	0,141 mm	0,1525 mm	0,1625 mm

Prilog 3. Dubina prodiranja pri ispitivanju tvrdoće za drveni kompozit ojačan česticama bukve

Redni broj očitavanja	10 sekundi	30 sekundi	60 sekundi
1	0,185 mm	0,200 mm	0,205 mm
2	0,135 mm	0,150 mm	0,155 mm
3	0,135 mm	0,145 mm	0,155 mm
4	0,250 mm	0,265 mm	0,275 mm
5	0,255 mm	0,270 mm	0,280 mm
6	0,220 mm	0,235 mm	0,245 mm
7	0,180 mm	0,190 mm	0,200 mm
8	0,370 mm	0,385 mm	0,395 mm
9	0,175 mm	0,190 mm	0,200 mm
10	0,275 mm	0,295 mm	0,305 mm
Srednja vrijednost	0,198 mm	0,2125 mm	0,2265 mm

Prilog 4. Dubina prodiranja pri ispitivanju tvrdoće za drveni kompozit ojačan česticama oraha

Redni broj očitavanja	10 sekundi	30 sekundi	60 sekundi
1	0,110 mm	0,120 mm	0,130 mm
2	0,165 mm	0,175 mm	0,185 mm
3	0,155 mm	0,165 mm	0,170 mm
4	0,185 mm	0,195 mm	0,205 mm
5	0,170 mm	0,180 mm	0,190 mm
6	0,160 mm	0,170 mm	0,180 mm
7	0,160 mm	0,170 mm	0,180 mm
8	0,160 mm	0,170 mm	0,175 mm
9	0,250 mm	0,265 mm	0,275 mm
10	0,145 mm	0,155 mm	0,165 mm
Srednja vrijednost	0,146 mm	0,1565 mm	0,1655 mm

Prilog 5. Dubina prodiranja pri ispitivanju tvrdoće za drveni kompozit ojačan česticama smreke

Redni broj očitavanja	10 sekundi	30 sekundi	60 sekundi
1	0,285 mm	0,300 mm	0,310 mm
2	0,310 mm	0,325 mm	0,340 mm
3	0,290 mm	0,305 mm	0,315 mm
4	0,295 mm	0,315 mm	0,325 mm
5	0,265 mm	0,280 mm	0,290 mm
6	0,365 mm	0,380 mm	0,395 mm
7	0,325 mm	0,345 mm	0,360 mm
8	0,240 mm	0,250 mm	0,260 mm
9	0,220 mm	0,230 mm	0,240 mm
10	0,190 mm	0,205 mm	0,215 mm
Srednja vrijednost	0,229 mm	0,2735 mm	0,285 mm